

Master

M2 - Hydrogéologie et Transferts

Année 2015-2016

Rapport de stage

**Identification et analyse des difficultés
rencontrées lors de la réalisation d'un
forage d'eau**

Millin Yohan

**Stage effectué du 11/01/2016 au 30/06/2016
BRGM, BRGM, 3 Avenue Claude Guillemin, Orléans
Tuteur de stage : Gutierrez Alexis, BRGM**

Sommaire

SOMMAIRE	2
REMERCIEMENT	3
INTRODUCTION : CADRE DE L'ETUDE	4
1 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1.1 LE FORAGE D'EAU, LES RÈGLES DE L'ART	5
1.1.1 Etude préliminaire : reconnaissances géologiques/ hydrogéologiques, dimensionnement et mise en place du chantier	5
1.1.2 Le forage et les différentes méthodes	7
1.1.3 Les fluides de forage	10
1.1.4 L'équipement du forage	11
1.1.5 La cimentation	15
1.1.6 Le développement	17
1.1.7 Les pompes d'essais	18
1.1.8 Equipement en tête de forage	19
1.2 LE DEPERISSEMENT D'UN FORAGE ET SA REHABILITATION	19
1.3 DIFFICULTES POTENTIELLES AU COURS DES ETAPES DE FORAGES	20
2 ANALYSE DES RETOURS D'EXPERIENCES	21
2.1 METHODOLOGIE : IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES INCIDENTS	21
2.1.1 Phase 1 : collecte d'informations pour identification des difficultés	22
2.1.2 Phase 2 : collecte d'informations sur l'occurrence et les solutions apportées pour une difficulté donnée	23
2.2 RESULTATS ET ANALYSE PAR THEMATIQUE	25
2.2.1 Généralités des incidents liés à des aléas géologiques et hydrogéologiques	25
2.2.2 Préconisations	30
2.2.3 Cas d'études représentatifs	36
2.2.4 Généralités des incidents liés à des défauts d'équipements et erreurs techniques	37
2.2.5 Préconisations	41
2.2.6 Cas d'études représentatifs	45
2.3 IMPACT DES INCIDENTS : COUTS FINANCIERS ET DEGATS ENVIRONNEMENTAUX	47
2.4 DIFFICULTES DU PROJET ET BIAIS DE L'ANALYSE	48
CONCLUSION	49
BIBLIOGRAPHIE	50
PRESENTATION DE L'ENTREPRISE	52

Liste des figures et des tableaux

FIGURE 1 : ETAPE DE DIMENSIONNEMENT D'UN OUVRAGE	6
FIGURE 2 : METHODE DE FORAGE ODEX (DPMF, 2009)	9
FIGURE 3 : FORAGE EN NAPPE LIBRE REALISE EN UNE SEULE ETAPE ET EN UN SEUL DIAMETRE (ALBOUY & SEGUIN, 2004)	16
FIGURE 4 : FORAGE TRAVERSANT UNE NAPPE LIBRE ET CAPTANT UNE NAPPE CAPTIVE (ALBOUY & SEGUIN, 2004)	17
FIGURE 5 : SCHEMATISATION DE L'ÉBOULEMENT DE TERRAINS MEUBLES LORS D'UN FORAGE (TERRAINS BOULANTS)	25
FIGURE 6 : SCHEMATISATION DES PERTES DE FLUIDES DANS UN MILIEU FRACTURE ET DANS UN MILIEU KARSTIQUE	27
FIGURE 7 : EVOLUTION AU COURS D'UN FORAGE DE LA REMONTEE DU TOIT DU KARST ET FORMATION D'UN DESORDRE EN SURFACE	28
FIGURE 8 : FREQUENCE DES INCIDENTS PROVOQUES PAR UN ALEA GEOLOGIQUE ET/OU HYDROGEOLOGIQUE SELON UNE ENQUETE MENEES AUPRES D'UN ECHANTILLONNAGE DE FOREURS	29
FIGURE 9 : REPARTITION DES INCIDENTS SELON LES FOREURS EN % PAR RAPPORT A LA MODALITE « FREQUENT »	29

FIGURE 10 : PHOTOGRAPHIES REPRESENTANT LES FISSURES, OBSERVEES SUR LES HABITATIONS, CAUSEES PAR LE GONFLEMENT DU SOUS-SOL, (BARRAS, 2015).....	36
FIGURE 11 : TEST SUR TUBAGE, SOURCE JOHNSON SCREENS.....	38
FIGURE 12 : FREQUENCE DES INCIDENTS CONCERNANT LES DEFAUTS TECHNIQUES SELON UNE ENQUETE MENEES AUPRES D'UN ECHANTILLONNAGE DE FOREURS.....	40
TABEAU 1 : SYNTHESE DES METHODES DE FORAGE (LAUGA, 1990, CHAP. 4).....	7
TABEAU 2 : INCIDENTS REPERTOIRES LORS DE LA PREMIERE PHASE DE SOLLICITATIONS.....	22
TABEAU 3 : GRILLE FOURNIE AUX PROFESSIONNELS DU FORAGE AFIN DE RECUEILLIR LEURS EXPERIENCES CONCERNANT LES DIFFICULTES DE FORAGE.....	24
TABEAU 4 : SYNTHESE DES PRECAUNISATIONS CONCERNANT LES ALEAS GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES.....	35
TABEAU 5 : SYNTHESES DES PRECONISATIONS CONCERNANT LES DEFAUTS TECHNIQUES	45

Remerciement

Tout d'abord, je tiens à remercier mon maître de stage, **M. Gutierrez Alexis**, hydrogéologue au sein du BRGM, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien. Grâce à sa confiance, j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions.

Je remercie également toute l'équipe **D3E/GDR** pour son accueil, son esprit d'équipe et en particulier **M. Barthelemy Yves, M. Klinka Thomas, M. Ouerghi Yamen, M. Perrin Jérôme, M. Arnaud Luc** qui m'ont orienté et écouté pendant mon stage.

Enfin, je tiens à remercier tous les acteurs qui touchent de loin ou de près au forage que ce soit les professionnels du BRGM, les bureaux d'études indépendants ou encore les foreurs français qui ont permis la bonne conduite de ce stage. Je remercie les deux associations de foreurs français pour leur participation ainsi que **Mr Guegan David, Johnson Screens**, pour son aide précieuse.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Introduction : Cadre de l'étude

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un stage avec le BRGM sous l'encadrement de M. Gutierrez. A. Elle concerne les difficultés rencontrées pendant la réalisation d'un forage d'eau ou de géothermie. Le but de l'étude est de recenser les difficultés qui arrivent pendant la réalisation d'un forage, de faire une analyse et d'émettre des préconisations pour éviter que cela ne se reproduise. Les difficultés qui surviennent pendant les étapes successives d'un forage sont connues mais peu documentées puisque la plupart du temps, elles sont passées sous silence ou discutées par ouï-dire.

Ce rapport permet avant tout de prévenir les professions qui peuvent toucher de loin ou de près au forage. La pertinence et la robustesse de l'étude reposent sur un nombre certain de dossiers ou de retours d'expériences mais aussi sur la bonne volonté de tous. Je remercie les acteurs qui ont participé au partage d'informations quelle que soit la nature de leur contribution.

Le forage est un ouvrage qui demande une haute technicité et une très bonne connaissance de la géologie et de l'hydrogéologie. Ce rapport n'a pas la prétention de venir démystifier les problèmes de forage mais plutôt de sensibiliser les différents acteurs du forage aux problèmes récurrents. La sécurité de la ressource naturelle doit rester l'objectif principal quand un forage est effectué.

Afin de discerner et de comprendre les difficultés récurrentes liées à la réalisation d'un forage, la ligne directrice de ce rapport se base, pour sa première partie, sur une étude approfondie de la bibliographie en ce qui concerne les règles de l'art du forage. La seconde partie du rapport concerne l'identification et l'analyse des difficultés de forage au travers de retours d'expériences recueillis dans toute la France.

1 Synthèse bibliographique

1.1 Le forage d'eau, les règles de l'art

Ce rapport n'a pas pour vocation de reprendre dans les détails les règles de l'art du forage. Cependant, il semble indispensable de connaître les différentes étapes de réalisation de forage avant de s'intéresser aux difficultés éventuelles. Dans ce but, une description est faite afin de rappeler l'essentiel des bonnes pratiques pour la réussite d'un forage. Des ouvrages spécialisés (Mabillot, Lauga, etc...), des rapports spécifiques (*cf.* Bibliographie) ainsi que le guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 (Brgm, 2004) ou la norme NF X 10-999 constituent les références pour la réalisation d'un forage dans les règles de l'art.

1.1.1 Etude préliminaire : reconnaissances géologiques/hydrogéologiques, dimensionnement et mise en place du chantier

Comme le préconise la norme NF X 10-999 (2014, p. 21), avant de commencer un quelconque travail de forage, il convient d'effectuer des formalités administratives selon le type d'ouvrage (DICT, déclaration, autorisation, dossier d'incidence, etc...). Le but de cette étape est d'anticiper des problèmes qui pourraient survenir à la fois pendant la mise en place du chantier et pendant la réalisation du forage. Dans cette étude préliminaire, il convient de déclarer l'ouvrage auprès des administrations compétentes.

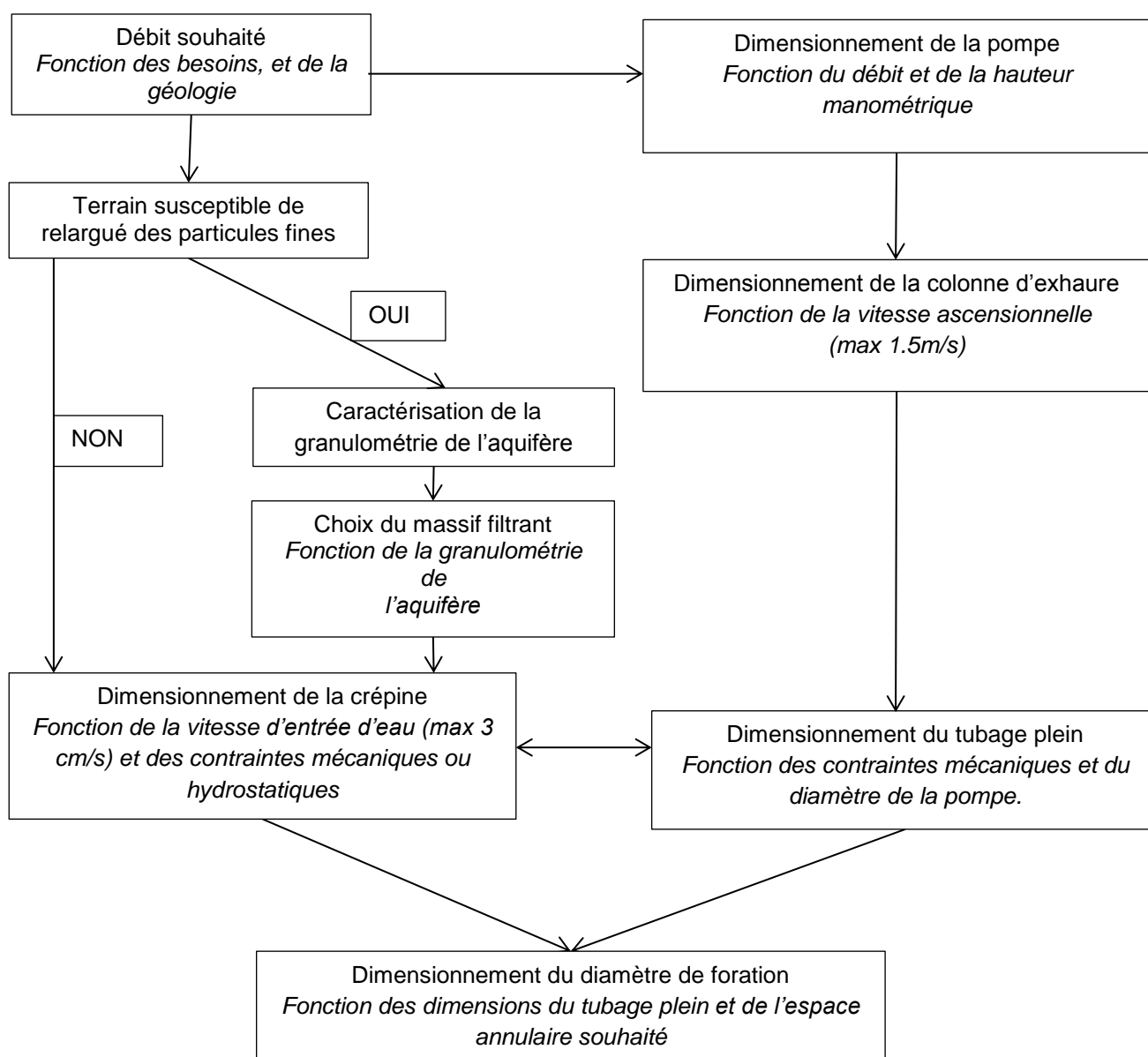
Une bonne connaissance du milieu est recommandée avant le forage, aussi bien dans la géologie que dans l'hydrogéologie (Sourisseau, Daum & Longin, 1998, p. 9). Le cas idéal est de faire un sondage, voire un carottage, qui permet de déterminer avec précision la succession géologique de la zone de forage. Cependant, dans certains cas le budget des travaux ne permet pas cette étude préalable. S'il n'est pas possible de réaliser une campagne de sondage, il en revient de l'expérience et de la bonne connaissance du sous-sol des différents intervenants.

De nos jours, il est relativement aisé de connaître la succession géologique d'une zone de forage puisque de nombreux outils numériques existent tel que le portail infoTerre (BRGM) qui compile les cartes entières de la géologie française (*Ibid.*). A cela, il faut ajouter les données BSS (Banque du Sous-Sol) qui, dans la majorité des cas, permettent de se représenter le sous-sol pour l'implantation du futur forage.

Dans le même temps, selon Mabillot (2005, pp.38-59), il convient de dimensionner l'ouvrage qui va dépendre de l'utilisation (Piézomètre, Alimentation en Eau Potable (AEP),

Reconnaissance, Irrigation, etc...). L'étape de dimensionnement va dépendre du débit d'exploitation souhaité et de la ressource disponible dans l'aquifère. Le paramètre qui va influencer le reste de l'ouvrage est la taille de la pompe (indirectement le débit souhaité). En effet, pour une taille de pompe donnée, le reste de l'équipement devra être adapté à celle-ci.

Voici un diagramme illustratif ([Figure 1](#)) qui résume les étapes de choix de l'équipement d'un forage.



[Figure 1 : étape de dimensionnement d'un ouvrage](#)

Enfin, selon le guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 (Brgm, 2004), viennent les préparatifs de mise en place du chantier qui doivent, de

manière générale, tout mettre en œuvre pour la préservation de la ressource naturelle et pour la réussite de l'ouvrage. Pour cela, des précautions simples sont à prendre :

- éloigner les produits polluants du forage,
- anticiper l'évacuation des débris de chantier,
- vérifier via la Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT), la présence de canalisations et de réseaux enterrés,
- vérifier l'accessibilité à la zone de forage.

1.1.2 Le forage et les différentes méthodes

Ce chapitre a pour but de rappeler les différentes méthodes utilisées pour les forages d'eau ainsi que leurs caractéristique clés. Il existe de nombreuses méthodes de foration qui dépendent essentiellement du sous-sol, du diamètre de l'ouvrage, de la profondeur voulue et des mesures *in situ* souhaitées. Voici un tableau ([Tableau 1](#)) qui fait la synthèse des méthodes existantes en fonction du type de terrain et de la profondeur atteinte.

Méthode de foration	Type de terrain	Profondeur
Battage	Fissuré	Moyenne
Havage	Meuble	Faible
Rotary	Tendre/boulant	Grande
MFT	Dur/fracturé	Moyenne/grande
MFT odex	Meuble/boulant	Moyenne/grande
Tarière	Argileux	Faible

[Tableau 1 : synthèse des méthodes de forage \(Lauga, 1990, chap. 4\)](#)

Le choix de la méthode utilisée pour un futur forage sera crucial puisque cela impactera directement sur l'avancement du chantier. Chaque technique de forage avance plus ou moins vite en fonction du terrain traversé. C'est la raison pour laquelle la connaissance de la géologie semble indispensable avant de commencer un forage.

Le battage

Ce procédé est très ancien, la méthode consiste à soulever un outil lourd (trépan) et à le laisser tomber sur la formation (Detay, 1993, p. 72). Il est possible de varier la fréquence et la hauteur de chute selon la dureté des formations. L'avantage de ce procédé est qu'il est simple et peu coûteux à mettre en place. Seulement, la vitesse d'avancement est relativement faible. Cette méthode n'est guère utilisée de nos jours à cause de son faible taux d'avancement.

Le havage ou procédé Bento

Pour cette méthode, le tubage pénètre dans la formation sous l'effet de son poids et/ou sous la force de vérins hydrauliques (*Ibid.* p.73). Une benne preneuse permet de curer progressivement l'intérieur du tubage. Cette technique permet un avancement rapide dans des formations meubles pour de faibles profondeurs et pour de gros diamètres.

La tarière

Cette méthode utilise un outil qui ressemble à une vis sans fin qui permet de forer sur de faibles profondeurs avec un gros diamètre (Brgm, 2004, p. 22). Très souvent utilisée pour les forages de reconnaissance, cette méthode convient dans les terrains limoneux-argileux et marneux.

Le rotary

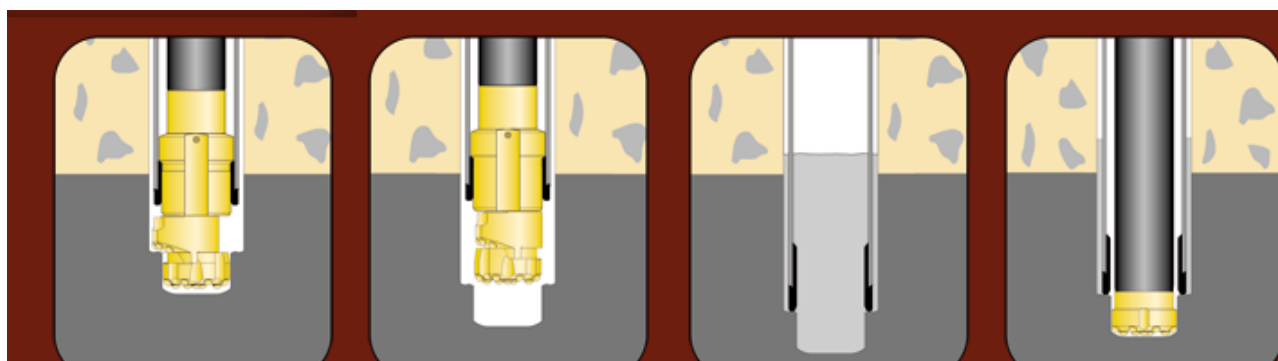
Selon Detay, (1993 pp. 73-75), cette méthode est très répandue dans les terrains meubles. La profondeur de forage peut être très importante. Par ailleurs, la foration n'est pas perturbée par les terrains peu stables ou plastiques (argiles) car cette méthode est obligatoirement accompagnée d'un fluide de forage.

Le marteau fond de trou

Cette méthode de forage utilise la percussion et la rotation (*Ibid.* p. 76). L'énergie utilisée pour actionner cet outillage est l'air comprimé à haute pression (10-25 bars). Cette méthode permet de forer dans des terrains durs. L'avancement du forage est rapide jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 200m, la limitation étant principalement due à la puissance du compresseur et donc à la capacité de remonter le *Cutting*.

Odex ou marteau fond de trou à l'avancement

Cette méthode est la même que la méthode au marteau fond de trou à une différence près, un tubage de soutènement est mis en même temps que la foration pour éviter les éboulements du forage (*Ibid.*). Cette méthode est particulièrement efficace dans les terrains bouillants et incohérents. La figure ci-dessous ([Figure 2](#)) illustre le fonctionnement de la méthode ODEX.



[Figure 2 : méthode de forage ODEX \(DPMF, 2009\)](#)

Méthodes carottées

La méthode carottée utilise un tube carottier et un outil composé d'une couronne diamantée qui va permettre la remontée des échantillons intacts de terrain, à l'opposé des autres méthodes qui sont destructives par rapport aux échantillons prélevés (Mabillot, 2005, p. 95). La carotte est remontée selon une fréquence donnée (m) de façon à obtenir une coupe géologique mètre après mètre du forage. C'est une méthode de reconnaissance qui permet de donner la lithologie avec une précision appréciable. Les carottes sont placées dans un casier et analysées par la suite. Cette méthode fonctionne sur des terrains durs mais elle rencontre des difficultés sur des terrains meubles.

Le forage sonique

Le forage sonique permet de combler les lacunes du forage carotté. Cette méthode permet de récupérer de façon exploitable les *Cutting* dans des terrains sableux (Boart longyear 2012, p. 6). Cette méthode très innovante est peu développée pour le moment. Le principe est l'utilisation des vibrations hautes fréquences qui permettent de faire avancer un trépan carottier ou cuvelage dans les formations souterraines. Le principe est détaillé en annexe ([Annexe 1](#)).

1.1.3 Les fluides de forage

Comme vu précédemment, certaines méthodes de foration nécessitent un fluide de forage. On distingue deux familles de fluide de forages : les fluides à base d'eau et les fluides à base d'air. Selon Mabillot (2005, p. 79), le fluide de forage a plusieurs fonctions pendant l'étape de foration, il permet :

- de refroidir et de lubrifier l'outil de forage qui est soumis à de lourdes contraintes pendant la foration,
- de consolider les parois du forage (boue de forage) sous forme de pellicules argileuses, plus communément appelées *cake*,
- de remonter les *Cuttings* de forage à la surface,
- de gérer, le cas échéant, une venue d'eau artésienne en faisant contre pression (réglage de la densité de la boue),
- de savoir s'il y a des pertes ou des arrivées d'eau en comparant le volume injecté et le volume récupéré de fluide.

Des paramètres importants sont à prendre en compte dans l'utilisation d'un fluide de forage (Lauga, 1990, chap. 6) :

- pour les fluides à base d'air :
 - o la pression et la puissance du compresseur vont être des facteurs déterminants de la vitesse de foration et de la remontée du *Cutting*,
 - o la présence de fissures peut empêcher la remontée du *Cutting* ; de la mousse stabilisée peut alors être rajoutée, ce qui permettra la remontée de celui-ci,
- pour les fluides à base d'eau, il existe plusieurs types de boues telles que les boues bentonitiques et les boues polymères ; pour chacune, les paramètres importants sont cités ci-dessous :
 - o le contrôle de la densité est obligatoire pour la réussite de l'ouvrage : une boue trop dense aura tendance à colmater l'ouvrage, tandis qu'une boue qui ne le sera pas assez ne sera pas capable de remonter les *Cuttings* et de maintenir la paroi. L'ajustement de la densité de la boue doit se faire de façon réactive. En effet, il arrive que par contact avec une arrivée d'eau, la boue se dilue et baisse en densité ou bien qu'une perte dans une zone fissurée entraîne la perte totale de la boue. Il est donc recommandé de ne pas négliger ce paramètre,

- la viscosité de la boue permet à l'outil de travailler dans de bonnes conditions et permet une bonne remontée du *Cutting*,
- le *cake* est le dépôt que laisse la boue sur les parois du forage. Ce paramètre dépend de la composition initiale de la boue et donc des paramètres cités précédemment,
- d'autres paramètres comme le pH et la teneur en sable sont à vérifier.

En complément de ces informations, la plaquette « les fluides de forage » en annexe ([Annexe 2](#)) permet de décrire l'utilisation des fluides de forage.

1.1.4 L'équipement du forage

Le but du forage d'eau est le prélèvement de la ressource en eau et ce de façon optimale. Pour cela, l'équipement installé dans le forage doit être adapté au diamètre du forage, au débit souhaité, à la nature du sous-sol et aussi permettre l'exploitation de l'ouvrage de façon pérenne et productive.

1.1.4.1 Caractéristiques

→ Le tubage plein

Le tubage plein a pour but :

- de maintenir les parois du forage,
- d'isoler les arrivées d'eau non captées,
- d'accueillir la pompe.

Selon M. Detay (1993, p. 91), le tubage plein est un tubage lisse qui sert le plus souvent de chambre de pompage. Ce tubage existe sous différents diamètres et types de matériaux et doit être capable de résister aux contraintes suivantes :

- | | | |
|-------------------------|---|---|
| - force d'écrasement, | } | Dépendant du diamètre et de l'épaisseur du tubage |
| - force de traction, | | |
| - force d'éclatement, | | |
| - force de compression, | | |
| - résistance thermique, | } | Dépendant de la nature du tubage |
| - capacité inoxydable, | | |

En ce qui concerne la nature de matériau utilisé, il faut distinguer deux familles : le tubage acier et le tubage plastique. Le tableau en annexe ([Annexe 3](#)) permet de distinguer la totalité des types de tubage ainsi que leurs caractéristiques principales.

➔ Le tubage crépiné et le bouchon de fond de forage

Le tubage crépiné se trouve au niveau des arrivées d'eau ou plus généralement en face de l'aquifère exploité. La crépine a pour rôle principal de drainer la formation aquifère en limitant la migration de particules solides (Detay, 1993, p. 92). Il existe plusieurs types de crépines qui sont dépendantes de la nature du tubage et surtout dépendantes du type d'aquifère capté. Effectivement, il existe une grande variabilité de réservoirs géologiques, allant des sables, au milieu de socle, en passant par les roches calcaires. Les différentes crépines vont être au mieux adaptées à un type de milieu pour faire en sorte que la productivité de l'ouvrage soit maximale avec un minimum de contraintes. Le tableau en annexe ([Annexe 4](#)) permet de distinguer chaque type de crépine existante en fonction de leurs caractéristiques principales.

La taille des fentes ou *slot* des crépines devra être calibrée en fonction du massif filtrant ou du terrain rencontré de façon à ce que la crépine puisse retenir celui-ci. Le dimensionnement du *slot* doit permettre la rétention d'au moins 90% des grains du massif filtrant. La crépine est soumise aux mêmes forces que le tubage plein et doit être capable de résister aux contraintes mécaniques et thermiques qui lui sont imposées (*Les medias filtrants en forage*, 2013).

Une autre contrainte rentre en jeu avec la crépine, il s'agit de la vitesse d'entrée d'eau dans la crépine qui dépend de plusieurs paramètres :

- la hauteur de crépine,
- la taille des fentes (*slot*),
- le débit de pompage.

Ces trois paramètres vont gouverner la vitesse d'entrée d'eau dans la crépine. La valeur seuil de 3cm/s doit être respectée, si tel n'est pas le cas, la pérennité de l'ouvrage peut être mise en jeu (Bart, 2011). En effet, si la vitesse d'entrée d'eau dans la crépine est trop importante plusieurs phénomènes néfastes à l'ouvrage sont possibles :

- ensablement accru du forage,
- érosion accélérée de la crépine,
- écoulement turbulent, création de ponts de sable.

Ceci va nuire, à termes, à la longévité de l'ouvrage et indirectement à sa productivité. Enfin, au fond du forage doit être placé un tube de sédimentation qui recueillera la sédimentation des fines au cours de la phase exploitation.

→ Le massif filtrant et le joint d'étanchéité

Le massif filtrant se place entre la crépine et la paroi du forage, autrement dit, dans l'espace annulaire. Le massif filtrant permet la tenue du terrain et l'évacuation des particules des formations géologiques instables. Detay (1993, p. 99) énonce que le massif filtrant va être dépendant de la granulométrie de la formation aquifère exploitée et doit répondre aux obligations suivantes :

- être désinfecté et sans particules fines,
- être placé uniquement devant la formation aquifère exploitée,
- l'épaisseur du massif filtrant doit être comprise entre 2 à 3 pouces au rayon,
- sa granulométrie doit être calibrée de façon optimale par rapport à la formation aquifère exploitée,
- le massif filtrant doit être de nature siliceuse en raison de son inertie dans le milieu.

La figure en annexe ([Annexe 5](#)) permet de donner un exemple du choix du massif filtrant en fonction de la granulométrie de l'aquifère.

Le joint d'étanchéité qui se trouve entre le massif filtrant et le coulis de ciment doit permettre d'éviter la migration du ciment au sein de massif filtrant. La norme NF X 10-999 (2014) mentionne que l'épaisseur du joint doit être au minimum de 1m avec un temps de gonflement des argiles d'au moins deux heures.

→ La pompe immergée et la colonne d'exhaure

Le dimensionnement de la pompe sera fonction de la profondeur finale de pompage et du débit d'exploitation de l'ouvrage. La pompe doit impérativement être au niveau des tubages pleins et suffisamment éloignée des crépines pour éviter tout dénoyage de celles-ci.

Il est préconisé de laisser, entre la pompe et le tubage, un espace d'au moins un pouce afin que la circulation de l'eau autour de la pompe se fasse correctement. Bart (2011) ajoute que la vitesse ascensionnelle ne doit pas dépasser la valeur de 1.5m/s sous peine de créer un écoulement au sein de la colonne d'exhaure turbulent qui peut provoquer :

- des phénomènes de cavitation,
- une instabilité de la colonne d'exhaure,
- de fortes pertes de charge.

1.1.4.2 Mise en place de l'équipement

Avant de mettre en place l'équipement, il convient de vérifier certains paramètres du forage et de calculer les contraintes qui vont être soumises aux différents tubages ainsi que les différents volumes d'injections (Mabillot, 2005, pp. 112-113) :

- vérifier la verticalité et la rectitude de l'ouvrage. Il est recommandé que l'ouvrage ne dévie pas de plus d'un degré par tranche de 30m. La figure ([Annexe 6](#)) illustre les différents cas de déviations d'un forage et démontre qu'un forage peut être droit mais pas vertical,
- contrôler la longueur de tube afin de connaître mètre par mètre la longueur de tube mise en place ainsi que le pied du tubage.

→ La descente des tubages

La mise en place du tubage doit se faire avec certaines précautions selon Lauga (1990, chap. 6) :

- pour les tubes PVC et PEHD :
 - une attention particulière doit être portée afin d'éviter d'éventuelles chutes accidentelles qui peuvent provoquer la casse du tube,
 - il convient de vérifier les filetages des raccords (si PVC vissé),
- pour les tubes acier :
 - il faut veiller à ne pas mettre en contact différents aciers sous peine de créer une dégradation de l'acier (corrosion électrochimique),
 - il convient d'éviter les soudures sur de l'acier inoxydable, cela risque d'entraîner une perte de la protection anti-oxydante,
 - il est nécessaire de contrôler les filetages des raccords.

→ Calcul du volume de massif filtrant et mise en place

Afin de réaliser cette étape, il convient de connaître les quantités de matériaux mises en jeu qui sont dépendantes de l'espace annulaire. La plaquette « importance du massif filtrant » en annexe ([Annexe 7](#)) permet de décrire la méthode de calcul du volume du massif filtrant ainsi que sa mise en place.

L'introduction du massif filtrant peut se faire selon plusieurs méthodes :

- méthode par canne d'injection,
- circulation inverse,
- méthode d'injection du massif filtrant en circulation inverse par circuit sous pression,
- méthode d'injection du massif filtrant par *Crossover tool*.

1.1.5 La cimentation

La cimentation de l'ouvrage se fait dans l'espace annulaire. La méthode consiste à remplir une partie de l'espace annulaire et du tubage plein. Il existe plusieurs cas de figure et plusieurs méthodes de mise en place du ciment. Selon Person (1980), la cimentation est une phase délicate qui demande une attention particulière. Effectivement, la cimentation permet l'isolation des nappes mais aussi d'ancrer et de confiner le tubage vis-à-vis des terrains. La plaquette « Importance de la cimentation » en annexe ([Annexe 8](#)) permet de résumer ce chapitre.

1.1.5.1 Caractéristiques

Au préalable, la qualité du ciment utilisée doit être choisie, selon Detay (1993, p. 101) en fonction :

- de la nature des terrains,
- de la température moyenne du terrain,
- de la vitesse de prise du ciment,
- de la résistance du ciment à l'écrasement après prise.

Pour les forages d'eau, la plupart du temps le ciment Portland ordinaire est utilisé. Il est déconseillé d'utiliser du ciment à prise rapide qui pourrait venir obstruer des parties hautes de l'ouvrage sans forcément atteindre la profondeur voulue.

Selon la norme NF X 10-999 (2014), la phase de cimentation a plusieurs fonctions :

- éviter la pollution de la ressource :
 - o isoler les eaux de surface (ruissellement, pluie) avec l'eau de la nappe captée,
 - o isoler deux nappes superposées afin d'éviter toute contamination d'une nappe souterraine par une autre,
- colmater les zones de cavités ou de fissures qui provoquent des pertes de fluide de forage non désirées,

- fixer la colonne de tubage au terrain,
- protéger la colonne de tubage contre la corrosion du terrain.

Les deux cas de figure suivants permettent de conceptualiser l'utilité de la cimentation (Albouy & Seguin, 2004) :

- lors d'un forage pour l'exploitation d'un aquifère superficiel libre, l'ouvrage se fait habituellement en mono diamètre comme illustré ci-dessous ([Figure 3](#)),
- lors d'un forage pour l'exploitation d'un aquifère profond surmonté d'autres formations aquifères, l'ouvrage se fait en plusieurs étapes : d'abord, l'aveuglement de la nappe supérieure non exploitée, puis, la foration dans l'aquifère sollicité. De cette manière, aucun contact entre les aquifères n'est possible comme la figure ci-dessous le présente ([Figure 4](#)).

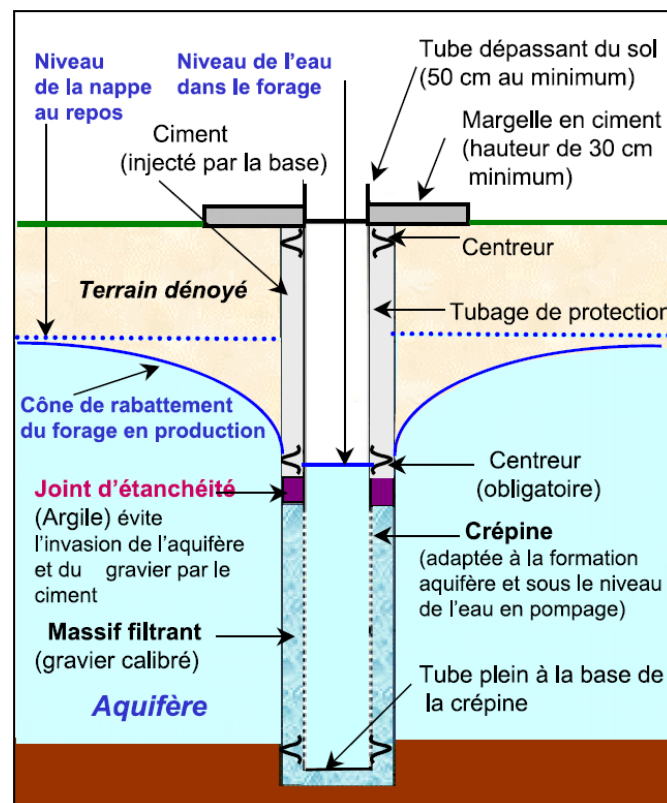


Figure 3 : forage en nappe libre réalisé en une seule étape et en un seul diamètre (Albouy & Seguin, 2004)

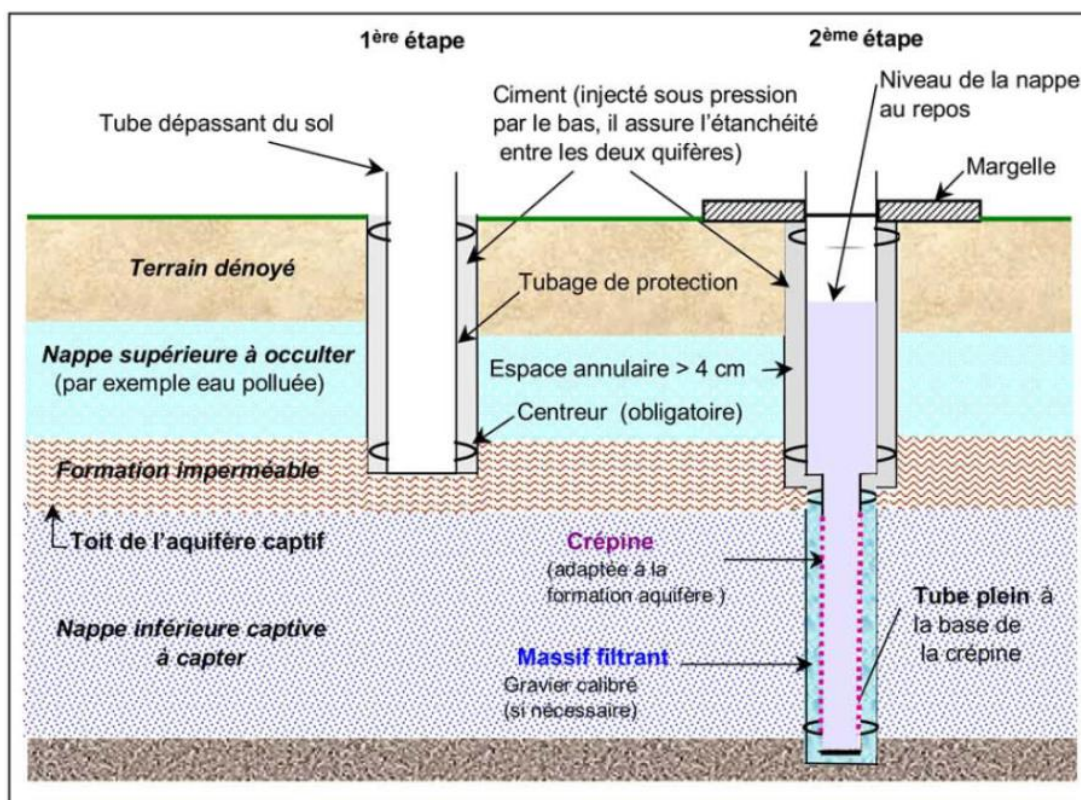


Figure 4 : forage traversant une nappe libre et captant une nappe captive (Albouy & Sequin, 2004)

1.1.5.2 Calcul du volume et mise en place du ciment

Le volume de ciment à injecter dans l'espace annulaire se calcule avant le début du chantier (Mabillot, 2005, p.117). Il est impératif de s'assurer de l'approvisionnement et des caractéristiques rhéologiques de celui-ci. De plus, la densité optimale du laitier final doit être aux alentours de 1.8. Il faut donc calculer la quantité d'eau à mélanger avec une quantité de ciment.

Une autre étape tout aussi fondamentale est de calculer les forces de collapse que peut engendrer la cimentation sur le tubage plein. De plus, pour les tubages PVC, cette étape est d'autant plus importante puisque le tubage PVC va réagir au contact de la chaleur créée par les réactions exothermiques du ciment (Mehmert, 2007). Le tableau en annexe ([Annexe 9](#)) fournit les valeurs de sécurité à appliquer sur la résistance du tubage en fonction de la température.

1.1.6 Le développement

Le développement permet de nettoyer l'ouvrage et d'augmenter la production de l'aquifère sollicité à travers les crépines. Cette étape est cruciale et ne doit pas être négligée puisqu'un forage bien développé permet une bonne productivité. L'action du développement se fait sur une zone proche du forage. Sur des terrains durs ou de

granulométrie homogène, le développement n'est pas obligatoire puisque ce type d'aquifère possède très peu de particules fines. Un pompage simple permet de faire le développement, il s'agit d'auto-développement (Mabillot, 2005, p. 135).

Selon Lauga (1990, chap. 9, p. 4), le développement a différents objectifs :

- évacuer les particules fines qui pourraient venir ensabler ou colmater le forage,
- s'il y a utilisation d'une boue de forage, le développement permet d'éliminer le *cake* qui s'est posé sur les parois du forage,
- accroître la porosité des formations rocheuses et augmenter la taille des arrivées d'eau dans les formations calcaires (développement chimique),
- augmenter la conductivité hydraulique autour du forage, limitant ainsi les effets de perte de charges,
- éviter la formation de ponts de sable qui entraînent une baisse conséquente de la conductivité hydraulique et qui peuvent endommager les crépines,
- atteindre un débit optimal de fonctionnement du forage.

Il existe plusieurs méthodes de développement d'un forage qui ont toutes pour but d'améliorer la productivité ainsi que la pérennité de l'ouvrage. Voici les méthodes les plus utilisées :

- le sur pompage,
- le pompage alterné,
- le pistonnage,
- les méthodes pneumatiques ou à air (*air lift*),
- le développement par lavage au jet d'eau sous pression (*jetting*),
- le développement chimique,
- le développement par fracturation (*cracking*),

1.1.7 Les pompages d'essais

Le pompage d'essai permet de déterminer d'une part, les capacités de production d'un ouvrage et d'autre part, de déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère exploité. Deux types d'essais sont à distinguer : l'essai de puits et l'essai de nappe.

1.1.7.1 Essai de puits : le pompage par palier avec repos

Selon Albouy et Seguin (2004, p. 41), le principe du pompage par paliers consiste à augmenter de façon progressive le débit de pompage avec des temps de repos. Cette

méthode permet de déduire le débit d'exploitation optimum du forage, ainsi que son débit critique à ne pas dépasser pendant l'exploitation, sous peine de détérioration ou de perte de productivité de l'ouvrage. Le pompage par paliers se fait sur trois à cinq pompes, avec une durée de pompage de 1h à 2h et avec un temps de repos identique.

1.1.7.2 Essai de nappe : le pompage de longue durée

Le pompage de longue durée permet la caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère sollicité (*Ibid.* p. 42). Il permet aussi d'apprécier l'influence du pompage sur la zone concernée et sur les forages alentours. Ce type d'essai renseigne sur les possibles effets de « limites » qui peuvent être rencontrés (limite étanche, limite d'alimentation). Le temps de pompage doit être au minimum de 48h et de 72h dans l'idéal.

1.1.8 Equipement en tête de forage

D'après la norme NF X 10-999 (2014), pour finaliser le forage dans les règles de l'art, il convient d'équiper la tête du forage pour la préservation de l'ouvrage. L'équipement en tête de forage doit servir à :

- signaler la présence d'un forage,
- protéger l'intrusion des eaux météoriques dans le forage,
- empêcher l'infiltration directe aux alentours du forage,
- prévenir contre le vandalisme.

La tête de forage doit au moins dépasser de 0.50m par rapport au sol et doit être muni d'un capot de fermeture. De plus, une dalle (ou margelle de protection) doit impérativement être mise en place avec une surface minimale de 3m². Si la zone est susceptible d'être inondée, la hauteur de la tête de forage doit être choisie de telle sorte que, quelle que soit la puissance de l'inondation, le forage ne soit pas submergé.

1.2 Le dépérissement d'un forage et sa réhabilitation

Un forage a pour vocation d'avoir une certaine pérennité. Un ouvrage confectionné dans les règles de l'art peut être opérationnel entre 30 et 50 ans. Ce phénomène de vieillissement est inévitable puisqu'il s'accompagne de deux phénomènes majeurs : la corrosion (si équipement métallique) et le colmatage. La plaquette « vieillissement d'un forage » en annexe ([Annexe 10](#)) décrit les principaux processus de vieillissement et de réhabilitation d'un forage. En cas de dépérissement avéré, une réhabilitation est obligatoire. Cependant, cette opération n'est pas sans risque pour l'ouvrage et peut l'endommager de façon irréversible.

Parfois, dans les cas extrêmes, l'abandon du forage est préférable. En effet, si celui-ci est considéré comme dangereux pour la ressource (suite à un examen), soit pour des risques physiques (danger de chute, de jets de détritiques) ou bien pour des risques de pollutions (Lamotte & Bonhomme, 2003, p. 8).

1.3 Difficultés potentielles au cours des étapes de forages

La littérature mentionne rarement les difficultés qui existent pendant les phases de forage et les phases de mise en place de l'équipement. D'après Lauga (1990, chap. 13, p. 4), les accidents de forage peuvent être classés en deux catégories :

- pendant le forage, le blocage du train de tige ou de l'outil entraîne la rupture ou le dévissage du train de tige,
- pendant la mise en place de l'équipement, la chute d'un outil, d'un objet ou d'un tubage.

Ces accidents peuvent provenir d'une usure excessive, d'un outil de forage non approprié ou encore de paramètres de forage non suivis. Pour remédier à ces accidents, il existe plusieurs méthodes qui sont détaillées dans la plaquette « instrumentation » ([Annexe 11](#)). Il faut ajouter à cela l'étude sur les impacts potentiels liés à la réalisation d'un forage (Bézèlques-Courtade & Durst, 2012) qui mentionne que par le non-respect des règles de l'art ou une méconnaissance géologique et/ou hydrogéologique, de lourdes conséquences sur la réussite du forage peuvent intervenir. Le tableau ([Annexe 12](#)) provenant de l'étude détermine les milieux géologiques particuliers ainsi que leurs impacts potentiels. Les auteurs listent également les risques liés :

- à l'installation du chantier ([Annexe 13](#)),
- à l'installation et au choix du tubage ([Annexe 14](#)),
- à la cimentation ([Annexe 15](#)).

Cette étude permet de donner un aperçu de ce qui peut se produire pendant la réalisation d'un forage d'eau ou géothermique. Afin d'identifier et d'analyser les difficultés qui surviennent pendant les étapes de forages, une collecte d'informations auprès des acteurs du monde du forage semblait indispensable. L'étude de Bézèlques-Courtade et Durst (2012) est un socle sur lequel ce rapport se base. De cette étude initiale, il ressort que peu d'informations circulent sur les difficultés liées à la réalisation d'un forage. « Si un certain nombre d'informations circulent par ouï-dire, il est rare de pouvoir obtenir des précisions sur le lieu précis ou la nature réelle de l'incident » (*Ibid.*). Cette phrase résume

la situation. Effectivement, les différents retours d'expériences qui ont pu être collectés dans ce rapport ne sont pas toujours précis et la nature de l'incident pas forcément déterminée.

2 Analyse des retours d'expériences

2.1 Méthodologie : Identification et classification des incidents

Les retours d'expériences qui vont être utilisés dans cette partie du rapport reposent sur une collecte orale et écrite provenant des quatre coins de la France. Avant de rentrer dans les détails, il est nécessaire de rappeler que tous les cas qui vont être évoqués sont anonymes et dans le respect de la confidentialité de la source. Plusieurs phases d'enquêtes ont dû être mises en place afin d'arriver à une représentation globale des difficultés qui peuvent survenir pendant la réalisation d'un forage.

- **La première phase d'étude (phase d'identification)** se rapporte aux retours d'expériences qui appartiennent aux professions d'hydrogéologues (BRGM, bureaux d'études, DDT, DREAL...). Au total, vingt-cinq retours d'expériences illustrés ([Tableau 2](#)) relatifs aux difficultés de forage ont pu être récoltés et ce avec plus ou moins de détails. Cette première phase d'étude a servi de base pour la seconde phase de sollicitation.
- **La seconde phase d'étude (phase d'analyse)** vise plus particulièrement les foreurs au travers de deux associations de foreurs français. Ne parvenant pas à avoir assez de retours clairs et précis, la décision a été prise d'interroger les foreurs davantage sur l'aspect de récurrence de tel ou tel incident plutôt que de les solliciter sur des incidents précis. Le tableau ci-dessous ([Tableau 3, p. 24](#)) a été élaboré en fonction des retours obtenus lors de la première phase de récolte mais aussi en fonction de l'étude de Bézèlques-Courtade et Durst (2012). Ce tableau ([Tableau 3, p. 24](#)) doit permettre de répondre aux questions suivantes : « A quelle fréquence rencontrez-vous ce type de difficultés ? Que faire quand vous êtes confrontés à ce type de difficultés ? »

Ces phases de récolte et d'analyse ont pris beaucoup de temps en raison des contraintes temporelles de chaque interlocuteur :

- soit 6 semaines environ pour la première phase,
- soit 8 semaines environ pour la seconde phase.

Les préconisations ou recommandations qui vont être citées par la suite sont rédigées de telle sorte qu'elles puissent être reprises dans un cahier des clauses techniques particulières (CCTP). Ces propositions se basent sur des **méthodes décrites dans la littérature et des méthodes utilisées réellement sur le terrain par les foreurs.**

2.1.1 Phase 1 : collecte d'informations pour identification des difficultés

La collecte n'a pas été évidente puisque peu de problèmes ou de difficultés sont rédigés de manière précise. La plupart des retours collectés sont des échanges oraux sujets à déformations. Cependant, certains retours sont décrits avec précisions et serviront d'exemples dans les chapitres qui vont suivre. Au total, vingt-cinq cas réels ont été collectés, synthétisés dans le tableau ci-dessous ([Tableau 2](#)).

Nature de l'incident	Catégories
Forage sur karst sous couverture (1)	Aléas hydrogéologues et/ou géologiques
Mise en contact d'un aquifère avec des évaporites (gonflement) (2)	
Mise en communication de deux nappes, risque de pollution (3)	
Eboulement des parois du forage (4)	
Mise en contact d'un aquifère avec des évaporites (gonflement) (5)	
Artésianisme imprévu : inondation dans un milieu urbain (6)	
Artésianisme imprévu (7)	
Collapse du tubage (8)	Défauts techniques
Collapse du tubage (9)	
Crépine cimentée (10)	
Crépine mal positionnée (11)	
Défaut de cimentation (12)	
Crépine cimentée (13)	
Gravillons mal tassés, infection bactérienne (14)	
Pont de sable, crépines bouchées par le sable, sable dans le forage (15)	
Défaut de cimentation, margelle de protection défectueuse (16)	
Défaut de cimentation, margelle de protection défectueuse (17)	
Poissons dans un forage (perte de matériels) (18)	
Flambage (19)	
Casse de l'outil, pompage d'essai non conventionnel (20)	
Tubage inox non conforme (21)	
Verticalité du forage non effective (22)	
Verticalité et diamètre du forage non adapté (23)	
Forage sur ligne électrique enterrée (24)	
Canalisation d'eau potable percée (25)	

[Tableau 2 : incidents répertoriés lors de la première phase de sollicitations](#)

La classification permet de rassembler différents incidents ou difficultés de forages selon leurs causes directes. Le classement s'est orienté comme suit :

- les différents aléas géologiques et hydrogéologiques qui peuvent survenir durant la réalisation d'un forage,
- les défauts techniques et les erreurs liées soit à de l'équipement ou une mise en place défailante de celui-ci.

Cette classification est la plus pertinente au regard des résultats traités et sera utilisée pendant toute l'analyse des retours d'expériences.

2.1.2 Phase 2 : collecte d'informations sur l'occurrence et les solutions apportées pour une difficulté donnée

Les principales difficultés ont été notées lors de la phase 1, dite d'identification. La phase 2 doit permettre de fournir une représentation globale des difficultés engendrées lors de la réalisation d'un forage. Pour ce faire, le tableau ci-dessous ([Tableau 3](#)) se répartit en trois colonnes qui ont chacune un objectif :

- la récurrence : il s'agit de déterminer la fréquence d'un événement de façon indicative selon l'avis général des foreurs sollicités. Cette notion de répétition est obtenue grâce à une échelle, comprenant cinq modalités, qui répond à une question : « selon votre expérience de foreur, comment pouvez-vous qualifier la fréquence de cet événement ? Très souvent ; fréquent ; rare ; exceptionnel ; jamais ». Cette étude reste indicative, aucun foreur sollicité ne tient de registres ou de statistiques concernant les difficultés qu'ils peuvent rencontrer pendant la réalisation d'un forage. La modalité « rare » correspond à un point neutre entre les autres modalités,
- le type de terrain : cet élément permet de demander aux foreurs sur quel type de terrain préférentiel se produit un événement donné,
- les remédiations ou les solutions apportées : les solutions représentent ce que font majoritairement les foreurs sollicités.

Les foreurs ont été sollicités pour remplir le tableau ([Tableau 3](#)) afin qu'ils puissent donner leurs avis et leurs expériences sur les différentes difficultés énumérées. Au total, onze foreurs ont pris le temps de répondre et de remplir le tableau ci-dessous. Au regard du faible nombre de réponses, l'analyse effectuée dans ce rapport ne représente pas une généralité mais un échantillonnage de la réalité. Les chapitres suivants vont traiter un à un, par catégorie, les difficultés rencontrées pendant la réalisation d'un forage. L'analyse et les résultats mis en évidence proviennent des deux phases de sollicitations effectuées pendant cette étude.

Adresse mail : y.millin@brgm.fr	Récurrence (Très souvent, fréquent, rare, exceptionnel)	Type de terrain (Alluvions, sables, argiles, calcaire, socle, etc...)	Remédiation et solution apportée	Commentaires
Identification des difficultés rencontrées pendant la réalisation d'un forage				
Aléas hydrogéologiques et géologiques				
1.Effondrement : milieu karstique				
2.Gonflement (hydratation d'anhydrite et argile)				
3.Inondation (Artésianisme non prévu)				
4.Effondrement : Terrains boullants				
5.Effondrement : dissolution de couche saline				
6.Perte du fluide de forage (karst, fracture)				
Défauts techniques				
1.Colmatage de la crépine				
2.Collapse tubage plein				
3.Collapse crépine				
3.Flambage				
4.Poissons dans le forage (outil, tube...)				
5.Verticalité				
6.Margelle de protection				
7.Absence de cimentation				

Tableau 3 : grille fournie aux professionnels du forage afin de recueillir leurs expériences concernant les difficultés de forage

2.2 Résultats et analyse par thématique

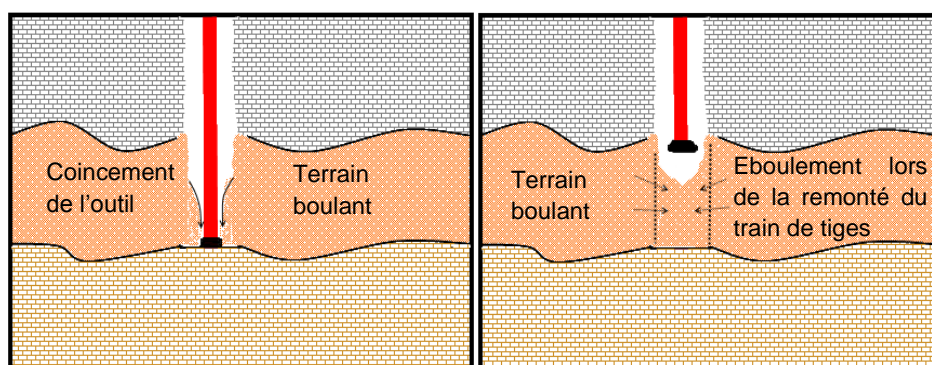
2.2.1 Généralités des incidents liés à des aléas géologiques et hydrogéologiques

Durant la foration, l'étape la plus délicate est de savoir sur quel milieu géologique le forage va avoir lieu et surtout le degré d'hétérogénéité du terrain. En général, la géologie régionale voire locale est connue mais parfois, selon le milieu cela change du tout au tout. Cette variabilité entraîne le plus souvent des conséquences inattendues. Des cas récurrents surviennent en raison d'une géologie ou d'un contexte hydrogéologique mal saisis. Les différents retours d'expériences recensés sont listés ci-dessous.

Chaque cas cité est lié, en principe, à un contexte particulier géologique et/ou hydrogéologique et à sa méconnaissance par les acteurs.

2.2.1.1 Terrains boullants

L'effondrement des parois du forage est causé par des terrains dits « boullants ». Ce cas est bien plus fréquent et problématique qu'il n'y paraît. En effet, il n'est pas rare qu'un forage rencontre plusieurs lithologies qui se succèdent avec des caractéristiques rhéologiques différentes. Lorsque les couches traversées sont meubles ou peu cohérentes, le trou ne se tient pas. Les terrains boullants, quand ils sont repérés, ne sont en soi pas un problème car ils peuvent être abordés avec des techniques spécifiques permettant de les maintenir. La difficulté consiste à caractériser et situer (verticalement) ces zones. Dans le cas où ces zones ont été négligées ou non repérées, cela entraîne principalement deux types de difficultés : le coincement de l'outil ou l'éboulement du terrain lors de la remontée du train de tige, illustré au travers de la figure ci-dessous ([Figure 5](#)).



[Figure 5 : schématisation de l'éboulement de terrains meubles lors d'un forage \(terrains boullants\)](#)

2.2.1.2 Hydratations d'un milieu

Le gonflement d'un terrain par hydratation d'une couche géologique a lieu lorsqu'un aquifère est mis en connexion, du fait du forage, avec des terrains non hydratés telles les couches d'anhydrites (sulfate de calcium anhydre) ou des argiles. Ce processus est connu, l'hydratation d'anhydrites provoque une réaction qui transforme l'anhydrite en gypse qui est une roche hydratée et bien plus volumique. La conséquence directe est le gonflement du terrain en surface. Pour que ce gonflement se produise, il faut tout de même que la couche soit fortement hydratée et relativement proche de la surface. Lors de l'essor de la géothermie en France, il y a quelques années, quelques forages ont été conçus de telle sorte que l'eau provenant d'un aquifère a été mise en contact avec des couches d'anhydrites ce qui a provoqué des désordres considérables en surface. Cette géologie particulière qui n'était recensée que localement, couplée avec un non-respect des règles de l'art, a entraîné des coûts démesurés de remise en état et un impact important sur l'habitat local.

L'autre cas d'hydratation concerne certains types d'argiles, tels que les smectites ou encore les montmorillonites qui ont un fort pouvoir d'hydratation principalement dû à un espace interfoliaire variable (10 à 20 Angstrom). Le remplissage de l'eau dans cette espace interfoliaire est la cause principale de gonflement des argiles et lors de l'hydratation de ce type d'argile avec un fluide de forage, un blocage du train de tige ou de l'outil peut avoir lieu (effet étai).

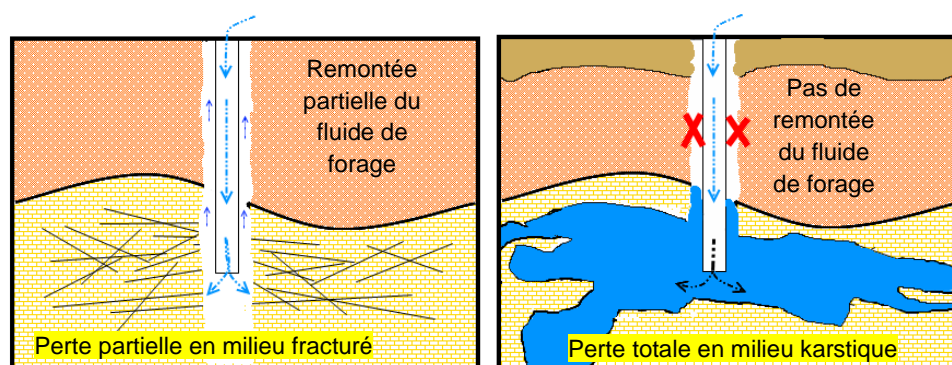
2.2.1.3 Dissolution d'une couche saline

La présence d'une couche saline et sa mise en contact avec l'eau d'un aquifère lors d'un forage peut entraîner, sous certaines conditions, un désordre tel qu'un affaissement de terrain et la formation d'une cavité souterraine. Certaines formations, telles les formations salifères, peuvent se dissoudre rapidement lorsqu'elles sont mises en contact avec de l'eau en mouvement. Pour qu'il y ait un désordre en surface, il faut que la couche saline soit proche de la surface et suffisamment alimentée en eau.

2.2.1.4 Perte en milieu fracturé

Les méthodes de forage qui font circuler un fluide (eau, boue, air) sont exposées à la perte partielle ou totale de ce fluide. Les pertes sont principalement dues à un milieu karstique, à des roches fortement fissurées, voire des formations poreuses très perméables (alluvions grossières). La méconnaissance de ces singularités géologiques va considérablement impacter le déroulement du forage. En effet, les *Cuttings* ne pourront

pas s'évacuer convenablement, l'outil va s'user plus rapidement. Cela va avoir un impact sur la pérennité et la vitesse d'avancement de l'ouvrage. La figure ci-dessous présente les cas de pertes de fluide ([Figure 6](#)).



[Figure 6 : schématisation des pertes de fluides dans un milieu fracturé et dans un milieu karstique](#)

2.2.1.5 Artésianisme et venue d'eau indésirable

L'artésianisme non prévu peut entraîner des conséquences graves autour du forage comme sur la ressource. Le forage artésien est un cas particulier de forages dans un aquifère captif, où la topographie se trouve plus basse que la hauteur piézométrique. Cela signifie que l'eau jaillit du forage, sans le besoin d'installer une pompe. Si cette artésianisme n'est pas prévu en amont du projet, avec un équipement adapté (capot de fermeture étanche, cimentation...), il y a risque d'inondation. Les conséquences peuvent être lourdes en milieu urbain, avec risque de saturation du réseau d'évacuation et d'inondation des voies de circulations ou des habitations.

2.2.1.6 Effondrement d'un milieu karstique sous couverture

L'effondrement en milieu karstique et la création en surface d'un désordre sont dus à une géologie particulière. Si le réseau karstique est recouvert d'un terrain meuble, lors de la foration dans le karst, il se peut qu'un effet de soutirage se mette en place et entraîne une quantité de terrain meuble dans le réseau karstique. Il y a alors un effet de sablier (soutirage), illustré ci-dessous ([Figures 7](#)). Au bout d'un certain temps, il y a formation d'un désordre en surface (fontis), qui peut varier d'une valeur décimétrique à plusieurs mètres.

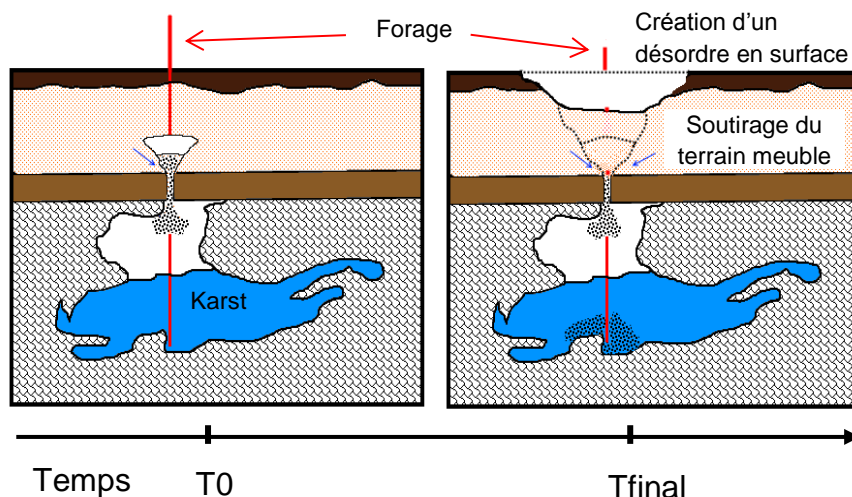
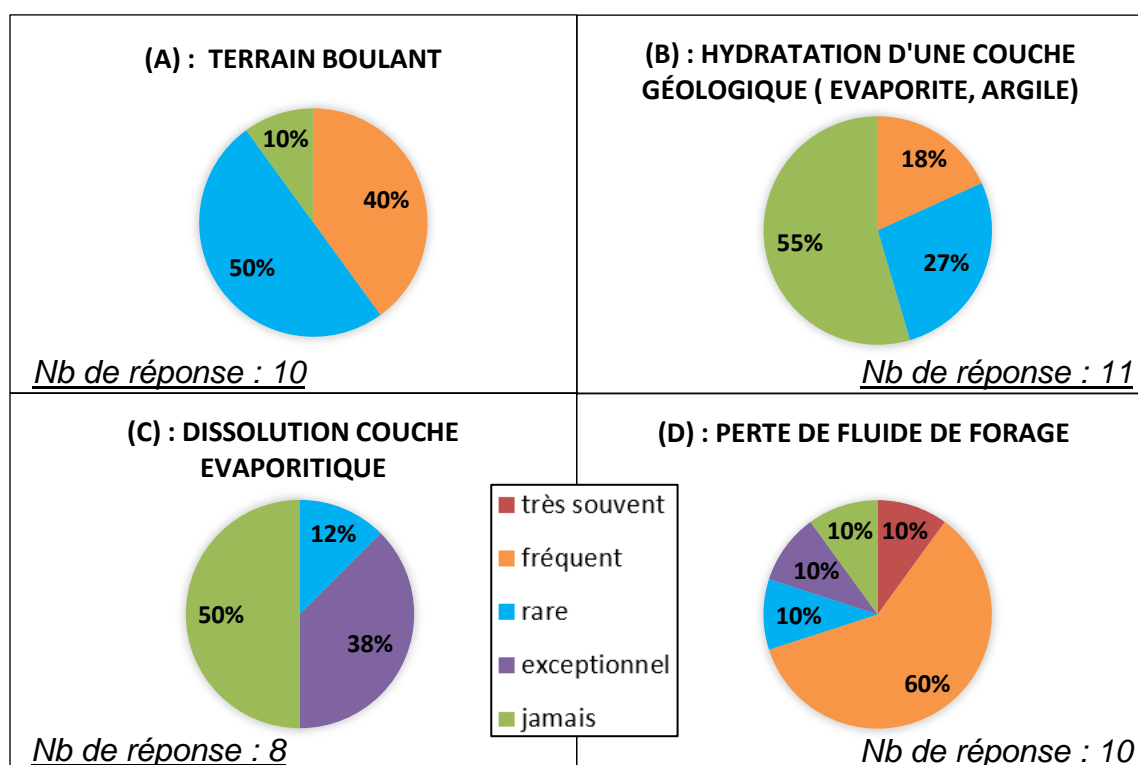


Figure 7 : évolution au cours d'un forage de la remontée du toit du karst et formation d'un désordre en surface

En ce qui concerne la fréquence des différents évènements cités dans les précédents chapitres, la figure ci-dessous ([Figure 8](#)) illustre ce que les foreurs sollicités ont répondu.



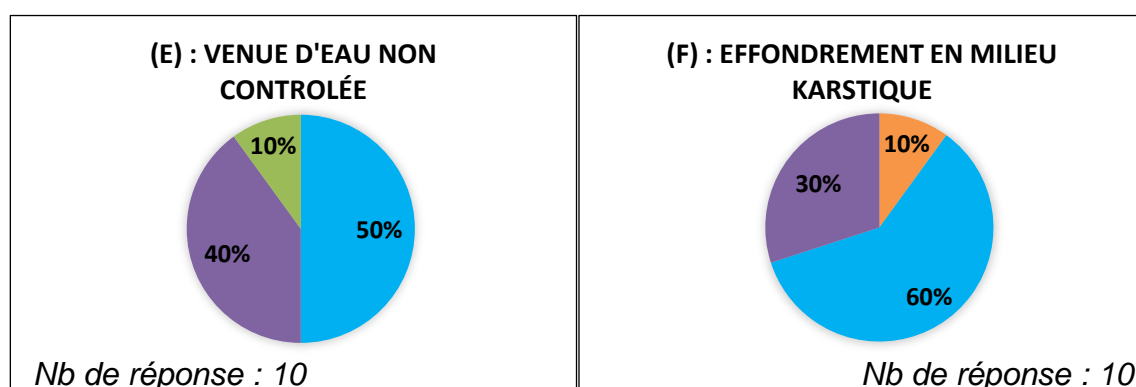
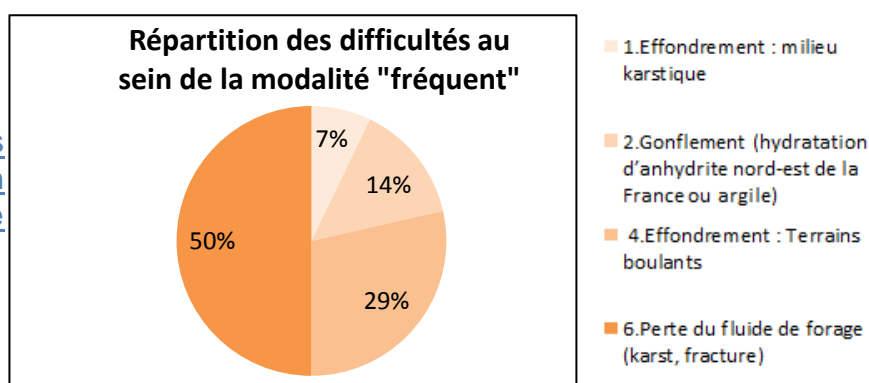


Figure 8 : fréquence des incidents provoqués par un aléa géologique et/ou hydrogéologique selon une enquête menée auprès d'un échantillonnage de foreurs

Ce résultat repose sur un échantillon de onze foreurs. Mais certains n'ont pas répondu entièrement au questionnaire, ce qui explique la variation du nombre de réponses. Les incidents les plus fréquents, selon l'échantillon de foreurs interrogé, sont les pertes de fluides (D) de forage et les terrains bouillants (A). A l'inverse, le gonflement (B) ou la dissolution d'une couche réagissant à l'eau (C) semblent exceptionnels voire ne se sont jamais produits.

Les résultats obtenus par cette étude présentent les géologies les plus courantes sur lesquelles les foreurs rencontrent les difficultés. En effet, les terrains dit « bouillants » peuvent se rencontrer au niveau des terrains productifs en eau, typiquement dans les alluvions ou encore dans les sables. Ces terrains sont souvent rencontrés puisqu'ils sont souvent producteurs en eau et par conséquent intéressent pour un potentiel captage. *Idem* pour les pertes de fluide de forage, les zones dites fracturées ou encore karstifiées sont des terrains fréquents dans la recherche en eau. Une autre analyse des résultats permet de comparer dans une même modalité (occurrence de l'incident : « fréquent ») les incidents les uns par rapport aux autres. Selon les foreurs interrogés et la modalité « fréquent », 50% des réponses concerne la perte du fluide de forage, 29% concerne les terrains bouillants tandis que 14% et 7% concernent respectivement les gonflements d'un couche et l'effondrement en milieu karstique. Ce résultat comparatif est illustré figure ci-dessous ([figure 9](#)).

Figure 9 : répartition des incidents selon les foreurs en % par rapport à la modalité « fréquent »



2.2.2 Préconisations

Pour chaque cas précédemment cité, la cause principale est la méconnaissance d'un contexte particulier et/ou le non-respect des règles de l'art. Les préconisations ci-après sont non exhaustives et évoluent en fonction de chaque situation rencontrée.

L'entrepreneur ainsi que le maître d'œuvre doivent mettre tout en œuvre avant l'étape de foration pour avoir un maximum d'informations en ce qui concerne le contexte dans lequel les travaux vont avoir lieu. L'implication d'un géologue et/ou d'un hydrogéologue peut alors être nécessaire. La géologie pouvant être très hétérogène, il en va de la réactivité du maître d'œuvre de s'adapter aux types de terrains rencontrés. De plus, les règles de l'art du forage doivent impérativement être respectées.

S'il s'avère que le contexte géologique ou hydrogéologique est différent de la coupe ou de la description prévisionnelle fournie par le maître d'œuvre, les travaux devront alors s'adapter au mieux à la situation. Une attention particulière est demandée au maître d'œuvre dans les cas suivants :

- éboulement de la paroi du forage,
- traversée d'une couche pouvant réagir avec un fluide de forage ou de l'eau,
- traversée d'une zone fracturée ou karstifiée provoquant la perte du fluide de forage,
- artésianisme et venue d'eau indésirable,
- traversée d'une zone karstifiée sous couvert d'un terrain meuble.

Après concertation avec l'entrepreneur, le maître d'œuvre propose des solutions pour résoudre ces difficultés en cohérence avec l'aléa rencontré. La réactivité de l'entrepreneur est des plus importantes.

2.2.2.1 Eboulement des parois du forage

La probabilité de passage de formations sableuses ou fracturées doit être anticipée. Si des éboulements sont susceptibles de se produire, le cahier des charges indiquera :

Si des éboulements surviennent pendant le forage, l'entrepreneur doit sécuriser le forage le plus rapidement possible en fonction la méthode de forage et les formations recoupés :

- ❖ *La méthode de forage utilisée est un fluide à base d'eau ou de boue, l'entrepreneur doit augmenter la densité de la boue permettant une meilleure tenue des zones*

boulantes, par l'ajout de baryte (densité : 4.6). Une vérification de l'épaisseur du cake est nécessaire.

- ❖ *La méthode de forage utilisée est l'air comprimé, l'entrepreneur doit ajouter de la mousse stabilisée entre 0.2 et 2% du poids d'eau utilisé (selon la puissance de l'éboulement) et entre 0.2% et 0.6% de polymères naturels stabilisants afin de garantir la tenue des parois des forages. Il peut aussi choisir d'aveugler la zone à risque avec la méthode du tubage à l'avancement.*
- ❖ *S'il s'agit d'une zone potentiellement aquifère, le tubage à l'avancement pourra être réalisé à l'aide d'une crépine, à condition que cela ne favorise pas la mise en relation entre plusieurs aquifères.*
- ❖ *Alternativement, en cas de formation bouillante qui ne peut être tubée à l'avancement et n'est pas destinée à être captée, une cimentation, puis la reprise de la foration après séchage permettra le maintien de la partie fragile (zone fracturée par exemple).*
- ❖ *Enfin, si la formation géologique est meuble ou si les éboulements se poursuivent, le passage à la méthode Rotary sera nécessaire.*

La décision se fait en accord avec le maître d'ouvrage ou de son représentant.

2.2.2.2 Couche géologique susceptible de réagir à l'apport d'un fluide de forage

Les couches géologiques concernées par ces préconisations sont :

- les couches évaporitiques (gypse, anhydrite),
- certaines couches argileuses.

Si le forage risque de traverser ce type de lithologie, le cahier des charges attirera l'attention de la manière suivante :

L'apport d'eau ou de fluide de forage peut entraîner un gonflement ou une dissolution de la couche pouvant provoquer en surface des désordres du type soulèvement ou affaissement.

Si de telles couches sont rencontrées, l'entrepreneur doit agir en fonction du fluide de forage retenu dans les CCTP :

- ❖ *le fluide de forage utilisé est de l'eau ou la boue, l'entrepreneur doit pour :*

- *une couche évaporitique, injecter une boue saumurée à base de sel, d'argile type attapulgite et de l'amidon. Les proportions suivantes sont conseillées mais doivent être adaptées en fonction de chaque cas : 360kg de sel par m³, 80-85kg d'argile par m³ et entre 12-15kg/m³ d'amidon. Il faudra prendre en compte la température de l'eau puisque la dissolution du sel dépend de ce paramètre. Ce procédé évite la contamination de la boue par une couche salifère et la dissolution de celle-ci. Il convient ensuite d'aveugler les couches concernées par cimentation,*
 - *une couche d'argile ou de marne, ajouter un additif de polyphosphate acide afin d'obtenir un pH de l'ordre de 7.5-8 qui permet de ralentir le phénomène de gonflement (mesure du pH avec un papier colorimétrique).*
- ❖ *si le fluide de forage est l'air, l'entrepreneur doit aveugler les zones à risque par tubage à l'avancement, puis les isoler par cimentation.*

La décision se fait en accord avec le maître d'ouvrage ou de son représentant.

2.2.2.3 Perte du fluide de forage partielle ou totale

- ❖ *En présence d'un milieu fracturé ou karstique, il est possible que des pertes du fluide de forage surviennent, ces pertes peuvent être partielles ou bien totales. Le cahier des charges attirera l'attention sur la probabilité de rencontrer ce type de terrains, il précisera :*
- ❖ *Si des pertes surviennent pendant le forage, le maître d'œuvre doit réagir rapidement pour compenser ce phénomène, avec des méthodes diverses selon que les pertes sont dans la zone à capter ou non. Dans la zone à capter, les pertes ne pourront être colmatées durablement.*
- ❖ *Si le fluide de forage est l'eau ou la boue, l'entrepreneur doit réduire la densité de la boue en ajoutant de l'eau et ajouter des colmatants en proportion avec la puissance de la perte. La dose de colmatant admise est comprise entre 10 à 40 kg/m³ de boue. Les produits colmatant suivants peuvent être utilisés : colmatant lamellaire, colmatant fibreux et colmatant granuleux. Il peut aussi être utilisé un mélange eau/ciment/bentonite (100kg de ciment/ 85L d'eau/ 8kg de bentonite) afin de colmater les fissures. Si l'approvisionnement en eau le permet, une circulation en perte totale à l'eau claire peut être envisagée.*

- ❖ *Si le fluide de forage est l'air, l'entrepreneur doit ajouter une mousse stabilisée permettant de limiter les pertes d'air et de remonter convenablement les cuttings. Les proportions sont les suivantes : mousse stabilisée entre 0.2 et 2% (selon la puissance des pertes) et un viscosifiant entre 0.2% et 0.6%. L'aveuglement de ces zones de pertes peut aussi être envisagé par méthode de tubage à l'avancement provisoire.*
- ❖ *En cas de pertes au-dessus (ou en dessous) de la zone à capter (tel un conduit karstique fortement développé et sans intérêts pour l'exploitation), un aveuglement est préconisé. Il sera réalisé soit par tubage suivi d'une cimentation si la réduction de diamètre induite sur le reste de la coupe est acceptable, soit par cimentation des zones de pertes et reformation. Les quantités de ciment peuvent alors dépasser largement les quantités théoriques initialement prévues.*

La décision se fait en accord avec le maître d'ouvrage ou de son représentant.

2.2.2.4 Artésianisme et venue d'eau indésirable

Si des venues d'eau imprévues surviennent pendant le forage (non mentionnées dans la coupe prévisionnelle), alors l'entrepreneur doit maîtriser le phénomène de façon à continuer le forage.

L'entrepreneur devra disposer sur sa machine d'un système permettant la mise en sécurité de l'ouvrage, constitué : d'une bride étanche, d'un manomètre et une vanne de sécurité en tête de forage (BOP) afin de garder la pression constante et pérenne pour l'ouvrage. L'entrepreneur précisera dans son offre le type de BOP qu'il mettra en œuvre (Hydrill, Shaffer, etc...).

Pendant la foration l'entrepreneur ajustera la densité du fluide de forage afin de compenser la pression artésienne de la manière suivante :

- ❖ *Si le fluide de forage est l'eau ou la boue, l'entrepreneur doit augmenter la densité de la boue en ajoutant de la baryte (densité 4.6)<< permettant d'arrêter ou de réduire la pression exercée par la venue d'eau. Afin d'ajuster la densité, l'entrepreneur doit prendre en compte la puissance de l'arrivée d'eau par rapport au fond du forage. Une fois qu'il aura déterminé la densité souhaitée, l'entrepreneur doit calculer la masse d'alourdissement à ajouter.*
- ❖ *Si le fluide de forage est l'air, l'entrepreneur utilisera 0.2% à 0.6% de viscosifiant stabilisant avec 0.2 à 2% de produit moussant. La mousse doit avoir une*

consistance « mousse à raser » et permet de contrôler la puissance de l'artésianisme. Cette méthode peut cependant se révéler inadaptée en présence de fortes arrivées d'eau.

Il est rappelé que la cimentation de l'espace annulaire doit se faire sous pression afin d'éviter la remontée du ciment, causée par la pression des venues d'eau.

La décision se fait en accord avec le maître d'ouvrage ou de son représentant.

2.2.2.5 Forage sur karst sous couverture

Les milieux karstiques sous une faible épaisseur de couverture (formation superficielle meuble, de quelques mètres d'épaisseur, abritant ou non une nappe phréatique) constituent un cas particulier en raison du risque de fontis. La coupe technique doit prévoir l'isolation des formations superficielles. Afin d'anticiper les incidents, le cahier des charges pourra préciser :

- ❖ *En raison de la présence de formations meubles au-dessus des niveaux calcaires, il y a un risque de désordre en surface (fontis) par effet de soutirage du terrain meuble, soit directement par le puits, soit indirectement dans le voisinage via le karst, lors de la foration avec des méthodes utilisant l'air comme fluide de forage. L'entrepreneur devra isoler les formations superficielles en ancrant un tubage de protection dans la formation calcaire, suivi d'une cimentation. Il est important que la formation meuble ne puisse être soutirée par la base du tubage.*

Si le karst est particulièrement proche de la surface, la voûte des cavités peut ne pas supporter la machine lors de la foration. Le cahier des charges précisera :

- ❖ *En raison de la faible profondeur des niveaux karstiques, les vibrations occasionnées par le forage risquent de provoquer l'effondrement du toit du karst et de causer des désordres en surface (fontis). Si des cavités sont effectivement rencontrées à faible profondeur, l'entrepreneur devra prévoir leur soutènement, soit par cimentation et reforage, soit par tubage et cimentation annulaire. Il peut se révéler nécessaire de déplacer le forage.*

2.2.2.6 Aléa non anticipable

- ❖ *Dans le cas où des éléments imprévus (tels que des couches géologiques salifères non anticipées) sont rencontrés, l'entrepreneur devra immédiatement en avvertir le maître d'ouvrage ou son représentant. La réactivité de l'entrepreneur à*

communiquer cette information est cruciale afin de mettre en place les moyens nécessaires.

- ❖ *Les produits à base d'hydrocarbure, d'huile et polymère synthétique sont à proscrire pour les forages d'eau puisqu'ils entraînent une dégradation qualitative de la ressource exploitée.*

2.2.2.7 Synthèse des préconisations

D'une manière générale, en cas de non-respect ou d'une insuffisance de réactivité de la part du maître d'œuvre, le forage est en péril et peut provoquer de lourdes conséquences qui peuvent aboutir à l'abandon de l'ouvrage. Le tableau ci-dessous ([Tableau 4](#)) synthétise les différentes préconisations à prendre afin de surmonter les difficultés citées dans ce chapitre.

Incidents répertoriés	Préconisations
<i>Eboulement des parois du forage</i>	Augmentation de la densité de la boue Tubage à l'avancement Viscosifiant et produit moussant pour fluide air
<i>Couche géologique susceptible de réagir à l'apport d'un fluide de forage (couche évaporitique et argiles)</i>	Aveuglements des couches et cimentation Boue saumurée Boue avec additif pyrophosphate
<i>Perte du fluide de forage partielle ou totale</i>	Aveuglement et cimentation Viscosifiant et produit moussant pour fluide air Colmatage des fissures Colmatage par boue bentonite-eau-ciment Forage en perte total à l'eau claire
<i>Artésianisme et venue d'eau indésirable</i>	Augmentation de la densité de la boue (baryte) Viscosifiant et produit moussant pour fluide air Cimentation sous pression Bride étanche en tête de forage
<i>Forage sur karst sous couverture</i>	Tubage à l'avancement et isolation de la partie supérieure du forage

[Tableau 4 : synthèse des précaunisations concernant les aléas géologiques et hydrogéologiques](#)

2.2.3 Cas d'études représentatifs

Cette partie permet d'illustrer des cas d'études représentatifs des difficultés liées à un contexte géologique et/ou hydrogéologique particulier. Pour des raisons de confidentialité, les cas réels qui vont être décrits ci-dessous ne feront pas de références aux lieux de l'incident, ni à leur date.

2.2.3.1 Forage géothermique défectueux, hydratation d'une couche d'anhydrite

Suite à la réalisation de sept sondes géothermiques verticales, il est observé un mouvement ascendant (soulèvement) du sol et des bâtiments. Ce mouvement est dû à l'hydratation d'une couche d'anhydrite par une nappe non isolée (insuffisance ou absence de cimentation). Quand l'anhydrite est en contact avec de l'eau, il se produit une transformation, il y a formation de gypse avec une augmentation du volume de la roche et par conséquent gonflement. L'impact en surface est conséquent puisque les bâtiments se fissurent et peuvent devenir inhabitables. Il a été estimé que la surrection est de l'ordre de 3mm/an. Les photographies ([Figure 10](#)) permettent de rendre compte de l'ampleur des dégâts causés sur les habitations.



Figure 10 : photographies représentant les fissures, observées sur les habitations, causées par le gonflement du sous-sol, (Barras, 2015)

A l'heure actuelle, des solutions sont en cours de développement pour ralentir et stopper le phénomène d'hydratation de ces couches gonflantes.

2.2.3.2 Artésianisme imprévu

Lors de la réalisation d'un piézomètre en secteur urbain, une importante arrivée d'eau a été localisée et n'a pas pu être canalisée. L'inondation de la parcelle ainsi que l'écoulement de l'eau vers la route ont été constatés. L'entreprise n'était pas suffisamment

équipée pour prévenir l'artésianisme. Le manque d'anticipation sur la gestion d'une arrivée d'eau artésienne est la principale cause de cet incident.

2.2.4 Généralités des incidents liés à des défauts d'équipements et erreurs techniques

Les défauts ou erreurs techniques concernent la mise en place des équipements et leurs dimensionnements, ainsi que les manipulations des opérateurs et leur savoir-faire à l'égard des règles de l'art du forage.

2.2.4.1 Forage sur un réseau enterré

Le manque d'informations sur les différents réseaux enterrés existant à la verticale du forage entraîne souvent de lourdes conséquences pour l'ouvrage et pour la zone alentour. Des cas de forage sur une canalisation en eau potable ou encore sur des lignes électriques provoquent de lourds dégâts.

2.2.4.2 Verticalité et rectitude

L'une des difficultés rencontrées pendant l'étape de foration est la verticalité et la régularité de l'ouvrage. Ce sont des paramètres à ne pas négliger, qui peuvent provoquer certains soucis par la suite. C'est notamment le cas lors de la mise en place de l'équipement. Il n'est pas rare qu'un forage dévie légèrement, principalement en raison du mouvement de rotation du train de tige et ce phénomène s'amplifie avec la profondeur. La cause principale de déviation d'un forage provient d'un avancement trop rapide par rapport à la dureté de la roche. Un changement ou un passage brusque d'un terrain tendre vers un terrain plus dur peut amener à la déviation du forage.

Un forage qui n'est pas vertical posera des problèmes lors de la mise en place des tubages et des crépines. De plus, les espaces annulaires ne seront pas respectés tout autour des éléments tubulaires (difficultés de centrage). Enfin, les éléments de pompage se retrouveront en contact avec les tubes de la chambre de pompage créant des phénomènes de corrosion et d'usure.

2.2.4.3 Flambage du train de tige ou du tube

Le flambage des tiges de forage survient lui aussi lors d'un avancement trop rapide de l'outil par rapport à la dureté de la roche. Le flambage peut aller jusqu'à la rupture des tiges aux endroits les plus fragiles, souvent au niveau du filetage. Il existe aussi des cas de flambage de tubage quand celui-ci reste bloqué contre la paroi du forage pour diverses

raisons (trou non vertical par exemple). La descente du tube est ralentie et la force dominante devient la compression.

2.2.4.4 Chute d'objets dans le forage (poissons)

La chute d'objets (outils, tiges, tubes...) arrive par erreurs techniques ou par usure du matériel. La plupart du temps cet incident entraîne un fort ralentissement du chantier voire l'abandon.

2.2.4.5 Écrasement ou force de collapse

Les incidents entraînant l'encrassement du tubage sont la résultante d'une pression latérale trop forte exercée soit par la mise en place du massif filtrant, soit par la mise en place de la cimentation ou encore par la pression naturelle qu'exerce le terrain. Cet incident aussi grave que couteux provoque la plupart du temps soit le surforage, soit l'abandon. La photographie ci-dessous ([Figure 11](#)) permet d'illustrer la déformation d'un tubage plein soumis à de trop fortes contraintes latérales.



[Figure 11 : test sur tubage, source Johnson Screens](#)

2.2.4.6 Le colmatage

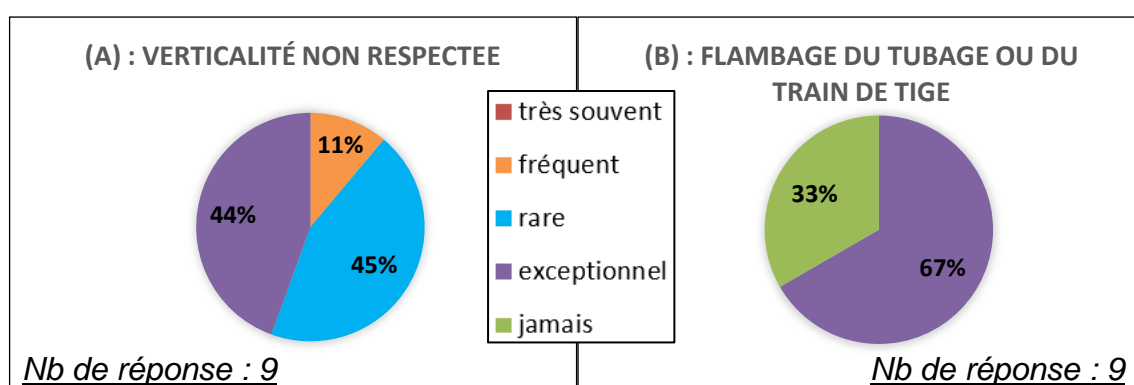
Le colmatage de la crépine dans le cas présent ne résulte pas d'une action étalée dans le temps (vieillessement du forage) mais bien lors de la foration. En effet, une mauvaise mise en place du massif filtrant et du ciment peut parfois entraîner le colmatage

des crépines par le ciment. Cela arrive pour des cas particuliers de forage (souvent mono diamètre). La négligence du calcul du volume de matériau à injecter dans le forage est une cause possible de ce colmatage. L'autre cas de colmatage de la crépine est un mauvais dimensionnement de celle-ci par rapport à la granulométrie du terrain qui l'entoure (massif filtrant ou aquifère).

2.2.4.7 L'absence de cimentation

L'absence ou la malfaçon de la cimentation est une faute grave dans la réalisation d'un forage. La mise en place ainsi que les calculs liés sont souvent négligés. En outre, la cimentation est le départ de nombreuses difficultés qui surviennent en réaction à sa non mise en place ou à sa malfaçon. L'absence de cimentation en surface ainsi que de margelle de protection augmentent les risques d'un transfert vertical de l'eau météorique vers la nappe captée. Ce vecteur de risque ne peut pas être accepté puisqu'il met en péril la ressource en eau.

La récurrence des difficultés citées précédemment est présentée avec la figure ci-dessous ([Figure 12](#)). Les analyses sur les défauts de margelle et les défauts de cimentation n'ont pas pu aboutir puisque seulement quatre foreurs sur les onze ont répondu à ce questionnaire.



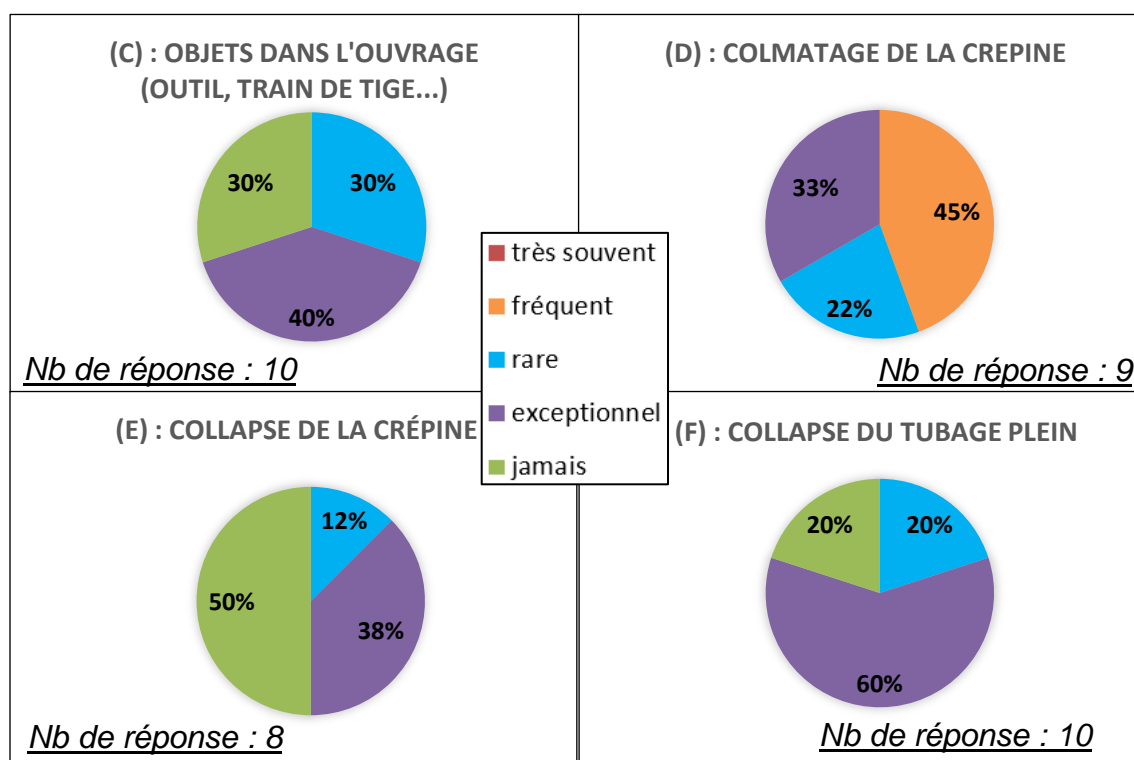


Figure 12 : fréquence des incidents concernant les défauts techniques selon une enquête menée auprès d'un échantillonnage de foreurs

Les résultats montrent que les collapses, qu'elles soient sur la crépine ou sur le tube plein, sont exceptionnelles (E & F). Par contre, le colmatage de la crépine (D) ainsi que le manque de verticalité (déviation du forage, A) semblent relativement fréquents selon les foreurs interrogés.

Les incidents ou erreurs techniques semblent en général plus rares que les incidents liés aux aléas géologiques. Cependant, l'échantillon de foreurs sollicité admet que le colmatage de la crépine est fréquent. Cela peut s'expliquer par la complexité du choix du massif filtrant en fonction de la granulométrie de l'aquifère capté. Les tests granulométriques n'étant pas systématiquement réalisés, cela peut expliquer un tel résultat.

2.2.5 Préconisations

Dans ce chapitre, la principale cause de difficultés est due au non-respect des règles de l'art. Il arrive parfois que ces règles ne soient pas adaptées pour une situation donnée. Dans la majorité des retours d'expériences récoltés, l'incident aurait pu être évité de façon simple en suivant les règles de l'art. L'enjeu économique est aussi un facteur qui peut provoquer ce type de mésaventures. Les préconisations ci-après sont non exhaustives et évoluent en fonction de chaque situation rencontrée.

L'entrepreneur doit prendre en considération ces préconisations non exhaustives afin de mener à bien les travaux de forage. Il doit être précautionneux et prudent à l'égard de la mise en place de l'équipement et de la qualité de celui-ci. Une attention particulière est demandée au maître d'œuvre afin d'éviter :

- *le sectionnement d'un réseau enterré,*
- *la perte d'objet dans le forage (outils, tige, tube...),*
- *le flambage du train de tige et du tube,*
- *le manque de verticalité de l'ouvrage.*

La mise en place du massif filtrant et du coulis de ciment doit se faire dans les règles de l'art. L'entrepreneur doit fournir de manière détaillée les calculs liés à leur mise en place (volume injecté, forces induites sur l'équipement) et les certificats de tubage mentionnant leurs résistances (écrasement, éclatement, traction). Une attention particulière est demandée au maître d'œuvre afin d'éviter :

- *le collapse du tube plein ou crépiné,*
- *le colmatage du tube crépiné.*

2.2.5.1 Détection d'un réseau enterré

- ❖ *Avant le début des travaux, l'entrepreneur doit s'assurer que l'implantation du forage ne recoupe pas un réseau enterré à l'aide d'une Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT). Un repérage des réseaux doit être fait avant l'engagement des travaux.*

2.2.5.2 Verticalité de l'ouvrage

- ❖ *L'entrepreneur doit respecter la valeur d'un degré sexagésimaux pour 30m de forage soit une déviation de 0.54m pour une profondeur de 30m. En cas de dépassement de cette valeur, le maître d'œuvre doit en informer le maître*

d'ouvrage. Une trop grande déviation de l'angle pourra poser des problèmes lors de la mise en place de l'équipement.

- ❖ *Le maître d'œuvre doit prendre en considération la nature du terrain traversé et ainsi adapter la vitesse d'avancement du train de tige. L'utilisation de masse tige et de stabilisateurs est conseillée afin de maintenir la verticalité et la rectitude.*

2.2.5.3 Force de flambage

- ❖ *L'entrepreneur doit vérifier en permanence que la vitesse d'avancement du train de tige reste constante et doit réagir le plus rapidement possible lors d'un changement brusque de vitesse. Une grande réactivité est nécessaire afin d'éviter la casse du train de tige ou de l'outil.*
- ❖ *Les paramètres de la rotation de l'outil et du moteur de la machine sont des indicateurs pertinents qui permettent de déterminer si la vitesse d'avancement n'est pas adaptée au terrain foré.*
- ❖ *Les tiges ainsi que les filetages doivent être vérifiés et en bon état pour la réussite du forage.*
- ❖ *L'entrepreneur doit respecter les limites de résistance des tiges fournies par le constructeur. La descente du tubage doit se faire avec précaution et sans à-coups.*
- ❖ *En cas de blocage ou de rétrécissement du trou du forage qui entraîne une force de compression sur le tubage, il convient de stopper la descente de celui-ci afin d'éviter tout flambage.*

2.2.5.4 Perte d'objet dans le forage

Le maître d'œuvre et l'entrepreneur doivent prendre toutes les précautions afin de sécuriser la zone proche du forage dans le but d'éviter toute chute d'objets depuis la surface. En cas de chute accidentelle, l'entrepreneur prévient au plus vite le maître d'œuvre qui décide de la marche à suivre selon la gravité de la situation :

- ❖ *s'il s'agit d'un objet peu encombrant mais suffisamment pour empêcher la poursuite de la foration, l'entrepreneur doit essayer le repêchage de l'objet avec l'accord du maître d'ouvrage,*
- ❖ *s'il s'agit de l'outil de forage ou d'une partie du train de tige à cause d'un dévissage ou d'une casse, l'entrepreneur doit essayer le repêchage mais doit aussi prendre en compte la faisabilité de celui-ci. En outre, si le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage estiment que le repêchage semble compromis et entraîne des délais inacceptables, la décision peut être l'arrêt du forage et son abandon.*

2.2.5.5 Colmatage et collapse de la crépine

La crépine permet de capter l'eau d'un aquifère donné dans les conditions optimales de production.

Une attention particulière est demandée au maître d'œuvre sur le choix et la mise en place du massif filtrant face à un aquifère sableux afin de préserver la crépine :

- ❖ *L'entrepreneur doit choisir la granulométrie du massif filtrant en cohérence avec la granulométrie de l'aquifère exploité (aquifère sableux). Ensuite, la crépine doit être adaptée à la granulométrie du massif filtrant. Le bon dimensionnement de la crépine et du massif filtrant doit empêcher des venues de sable dans l'ouvrage et limiter les pertes de charges.*
- ❖ *Lors de la mise en place du massif filtrant, l'entrepreneur devra s'assurer que l'espace annulaire soit suffisamment large, soit de 50-75mm au rayon, de telle sorte que le remplissage de celui-ci se fasse de façon homogène.*
- ❖ *Si la profondeur du forage est peu profond, l'entrepreneur peut utiliser la méthode gravitaire, avec l'accord du maître d'œuvre.*
- ❖ *Au-delà d'une certaine profondeur (de l'ordre d'une centaine de mètres), il est nécessaire d'utiliser une méthode d'injection sous pression. Si les CCTP ne mentionnent pas la méthode, l'entrepreneur peut proposer une méthode afin de remplir l'espace annulaire.*
- ❖ *La vérification du tassement du massif filtrant est obligatoire. En cas de forage mono diamètre, le développement doit se faire avant la cimentation. De ce fait, si la cote du massif filtrant diminue, l'entrepreneur doit rajouter le volume manquant. La cote du massif filtrant doit se trouver au-dessus de la cote des crépines de manière à garder une sécurité lors de la cimentation et éviter un colmatage par le ciment.*
- ❖ *Les calculs liés au volume et aux pressions induites sur l'équipement doivent être décrits par l'entrepreneur. A défaut, le maître d'œuvre peut fournir ces valeurs prévisionnelles afin d'éviter tout dommage sur la crépine.*

2.2.5.6 Défaut de cimentation

La cimentation est une étape primordiale du forage, puisque c'est par le biais de cette méthode que la ressource naturelle est protégée. L'entrepreneur doit tout mettre en œuvre pour la préservation de la ressource. En cas de défaut ou de non cimentation, l'entrepreneur encourt de lourdes sanctions avec le rebouchage du forage et la réalisation d'un nouvel ouvrage.

La clause suivante s'applique pour n'importe quelle méthode de cimentation de l'espace annulaire :

- ❖ *en aucun cas, deux aquifères ou plus ne doivent communiquer par le biais du forage,*
- ❖ *l'entrepreneur doit préciser en détail les caractéristiques du coulis injecté (ratio eau/ciment), l'idéal est d'obtenir une densité de coulis de 1.8,*
- ❖ *les zones et hauteurs prévisionnelles ainsi que les différentes passes de cimentation sont déterminées par le maître d'œuvre. L'entrepreneur doit suivre ces directives prévisionnelles et doit faire preuve de réactivité en cas de changement imprévu. L'injection du coulis sous pression est préférable quelle que soit la profondeur de l'ouvrage,*
- ❖ *l'espace annulaire doit être suffisamment large afin d'assurer une bonne cimentation, soit de 50-75mm au rayon. L'entrepreneur doit détailler de façon précise le volume prévisionnel de coulis à injecter ainsi que les pressions mises en jeu sur l'équipement. Le collapse de l'équipement doit être absolument évitée,*
- ❖ *l'injection du ciment ne doit pas réduire la production de l'aquifère exploité, autrement dit, le ciment ne doit pas colmater les crépines qui permettent l'exploitation de l'aquifère,*
- ❖ *la margelle de protection en surface doit répondre aux normes en vigueur et empêcher l'infiltration des eaux météoriques.*

2.2.5.7 Synthèse des préconisations

Le tableau ci-dessous ([Tableau 5](#)) synthétise les différentes préconisations à prendre afin de surmonter les difficultés citées dans ce chapitre.

Incidents répertoriés	Préconisations
2.1 Forage sur un réseau enterré	DICT
2.2 Verticalité de l'ouvrage	Adapter la vitesse d'avancement du forage Utilisation de <i>masse tige</i> et de stabilisateurs

2.3 Flambage	Adapter la vitesse d'avancement du forage Vérifier l'état d'usure des tiges Respecter les normes de compression soumises par le constructeur
2.4 Objets dans l'ouvrage	Sécuriser le trou du forage (protection physique) Repêchage ou abandon Prendre en compte la faisabilité du repêchage
2.5 Colmatage et collapse de la crépine	Dimensionnement de la crépine en fonction de la granulométrie du massif filtrant ou de l'aquifère Hauteur de sécurité du massif filtrant pour prévenir un éventuel tassement Mesure précise de la cote du massif filtrant Calcul des pressions exercées sur l'équipement
2.6 Défaut de cimentation	Définir les hauteurs à cimenter avec les calculs de pressions liés à la cimentation Injection sous pression du ciment Margelle de protection aux normes en vigueur Isoler les aquifères non sollicités Le ciment ne doit pas être en contact avec la partie crépiné de l'ouvrage

Tableau 5 : synthèses des préconisations concernant les défauts techniques

2.2.6 Cas d'études représentatifs

Les cas réels ne manquent pas mais le sujet est délicat. Le plus souvent, il s'agit d'une erreur de l'opérateur ou d'un accident. Cette étude en fait les frais puisque peu d'entreprises se risquent à parler ouvertement de ces différentes difficultés, qui dans certains cas, sont réparées ou arrangées. S'ajoute une perte de temps non négligeable et, dans le pire des cas, l'abandon du forage.

2.2.6.1 Flambage et collapse d'un tubage PEHD

Lors de la réalisation d'un piézomètre, la phase de cimentation ne s'est pas déroulée comme prévu et a provoqué la « collapse » d'un tubage. Auparavant, une description de l'ouvrage et des étapes prévisionnelles est faite pour comprendre l'ensemble de l'ouvrage :

- foration au rotary (\varnothing 374) sur de 0m à 15m, tubage de soutènement et cimentation,
- foration au rotary (\varnothing 250) sur 15m à 300m, tubage acier et cimentation,
- foration au rotary (\varnothing 171) sur 300m à 330m,
- mise en place en place de tube PEHD, \varnothing ext 125mm, ép. 7.4 mm avec une résistance à l'écrasement théorique à l'écrasement de 10 bars,
- mise en place du gravier par circulation inverse,
- cimentation en cinq passes entre le tube acier/tube PEHD.

La phase de descente du tubage PEHD a été compliquée mais réussie. Lors de la descente à la cote de -305m, l'effort nécessaire à la descente du tubage a fortement augmenté. Les vérifications par diagraphie diamètreur ont montré un rétrécissement de la crépine après la cote -305m. La cause la plus probable est le passage de la crépine dans une zone faisant verrou, freinant ainsi la descente de la complétion. La crépine est alors soumise à une force de compression avec le poids de la colonne. En ce qui concerne la mise en place du massif filtrant et du ciment, les cotes n'ont pas pu être mesurées avec précision.

- *Le volume théorique versé du massif filtrant correspondait à un niveau de gravier de, - 282. Le top gravier est impossible à mesurer.*
- *En se basant sur la coté théorique de -282, les passes de cimentation ont commencé.*
 - *Première passe, de 56m de hauteur, soit en théorie de -282m à -227m, le top du ciment n'est pas mesurable non plus. Un temps de repos de 20h est appliqué afin de limiter les effets de la température sur le PEHD.*
 - *Seconde passe, de 55m de hauteur, soit en théorie de -227m à -172m, le top du ciment arrive à la cote de -82m, ce qui correspond à un niveau de 90m au-dessus du niveau théorique.*

Deux raisons peuvent expliquer cette cote anormale du top ciment, soit le gravier est bien au-dessus de sa cote théorique, soit un tampon d'eau s'est formé lors de la seconde phase de ciment. Il est observé un écrasement entre -104m et -118m et une collapse totale à -135m due à la pression du ciment sur le PEHD.

Le niveau statique n'est pas connu mais il est mentionné que la seconde phase de cimentation se trouve au-dessus du niveau statique.

La méthode d'injection n'est pas mentionnée, ni même les calculs préalables avant l'injection. Ce cas de collapse aurait probablement pu être évité si les calculs des forces

induites sur le tube PEHD avait été faits. En effet, d'après le chapitre [1.1.5.2](#), il est possible d'estimer les contraintes induites sur le tubage. La force de collapse à une profondeur de 135m est estimée à 9.35 bars. Cette valeur se rapproche dangereusement de la résistance théorique du tubage PEHD qui est de 10 bars. A cela, il faut maintenant rajouter l'augmentation de la température due aux réactions exothermiques provoquées par la prise du ciment. Le PEHD va perdre de sa résistance. Afin de prendre en compte ce facteur, le coefficient de sécurité est appliqué à la résistance du tube (soit 0.75). Le tubage a alors une résistance de 7.5bars au-dessus du niveau statique, ce qui explique la rupture de ce tubage. Au-dessus du niveau statique, l'entrepreneur aurait dû faire des passes de cimentation de 35m ce qui aurait permis au tubage de résister.

2.3 Impact des incidents : coûts financiers et dégâts environnementaux

Les incidents présentés durant cette étude ont pu avoir un impact environnemental et la plupart du temps un impact sur le coût final du forage. Afin de comprendre l'impact financier d'un forage en général, une étude en parallèle à ce rapport a été menée sur le coût d'un forage en France en fonction de l'utilisation du type de forage. La note ([Annexe 16](#)) résume les résultats obtenus. En se basant sur les prix moyens des forages obtenus par cette étude, il est possible de se représenter le coût financier de l'abandon d'un forage suite à un incident.

A titre d'exemple, il est utilisé le cas du flambage et du collapse du tubage PEHD ([2.2.6.1](#)). Le prix initial du forage s'élevait à 115 000 euros hors taxes. Le coût de la réhabilitation par surforage est revenu à un prix de 64 000 euros. Au total, le forage a donc coûté 179 000 euros hors taxes. Une part de la responsabilité est attribuée à l'entrepreneur sur la cimentation défectueuse, ce qui a amené à un rabais du coût du forage de 9000 euros (une partie du coût du surforage et du nouveau tubage). Au-delà des aspects purement financiers, le chantier a pris un retard de presque deux ans.

Le volet environnemental lors d'un forage est une priorité. Cependant, lorsque survient un incident, il se peut que cela se répercute de façon non contrôlée sur la zone alentour au forage, voire sur la région géographique du forage. La pollution de la ressource et la création de désordres sont les risques majeurs lors d'un incident. Les cas, qui ont pu être cités lors de la partie « Aléas géologique et hydrogéologique », montrent qu'un forage qu'il soit pour la géothermie ou pour l'exploitation en eau peut provoquer de lourdes conséquences.

2.4 Difficultés du projet et biais de l'analyse

Les différents résultats et synthèses obtenus durant ce projet sont l'œuvre d'une forte collaboration avec les différents acteurs du forage. Qu'il s'agisse d'hydrogéologues ou de foreurs, cela n'a pas été facile de recueillir des informations détaillées sur tel ou tel incident. De plus, certains interlocuteurs n'ont pas souhaité répondre pour des raisons professionnelles (sujet confidentiel et sensible à l'entreprise). A cela, il faut rajouter le manque de temps des différents interlocuteurs interrogés, qui n'ont pas ou n'ont pas pu prendre le temps de répondre. Toutes ces difficultés ont conduit à un résultat mitigé autant dans la quantité que dans la qualité des retours récoltés.

En ce qui concerne les biais éventuels de l'analyse portée par cette étude, le principal vecteur provient de la seconde phase, avec la collecte d'informations sur la récurrence d'un événement selon un échantillon de foreurs. En effet, l'échelle de fréquence créée pour l'occasion reste arbitraire, puisque les différences entre chaque modalité dépendent de l'interprétation de chaque participant. Il convient de souligner que seulement onze foreurs de la profession ont répondu à l'appel sur environ cinquante sollicitations.

De plus, la notion de « type de terrain » de l'incident n'a pas pu être utilisée puisque les foreurs sollicités n'ont malheureusement pas tous répondu entièrement au tableau. Cela s'explique aussi par le rayon d'actions de chaque entreprise de forage sollicitée.

Enfin, certaines difficultés de forage n'ont pu être abordées en raison du manque d'explications ou de retours trop tardifs pour pouvoir les incorporer dans ce rapport. La liste ci-dessous, non exhaustive, décrit succinctement d'autres cas de difficultés rencontrées pendant la réalisation d'un forage :

- insuffisance du matériel, matériel non conforme (dimension et nature) et évacuation des déblais non respectée par rapport au CCTP,
- treuil pas assez puissant,
- compresseur non adapté à la profondeur de forage,
- développement défectueux, colmatage du massif filtrant avec augmentation des pertes de charges, tassement du massif filtrant avec création d'une zone morte,
- pH ultrabasique de l'eau (11 à 13) du forage quelques semaines après la fin des travaux, probablement un contact eau/ciment, défaut de cimentation,
- fuite d'hydrocarbure.
- Pendant la réhabilitation, incidents liés au rechemissage, difficultés à réhabiliter un ouvrage fortement détérioré.

Conclusion

Afin de conclure cette étude, il paraît prudent de rappeler que dans la majorité des cas, un forage se passe sans heurts et que les différentes difficultés énumérées dans ce rapport sont la plupart du temps surmontées. Cependant, lors d'un forage, il suffit de peu de choses pour que des incidents surviennent. Les différents aléas géologiques/hydrogéologiques ainsi que des défauts techniques peuvent entraîner le ralentissement voire l'abandon d'un forage. Cette étude a permis de recenser, de manière non exhaustive, les principales difficultés à l'œuvre pendant la réalisation d'un forage ainsi que les préconisations pour éviter toute mésaventure. Ce rapport devrait servir aux maîtres d'œuvres de futurs ouvrages dans la rédaction des cahiers des charges ainsi qu'aux professionnels du forage grâce au partage des retours d'expérience de leurs collègues. La préservation et la sauvegarde de la qualité et de la quantité de l'eau souterraine doit être l'objectif premier lors d'un forage qu'il soit pour l'exploitation en eau ou pour la géothermie.

La participation mitigée des professionnels de forage à cette étude montre bien qu'il existe encore des non-dits dans ce milieu et qu'il faudra du temps pour qu'un forage soit suivi en toute transparence. Des solutions pourraient être mises en place, de façon systématique, lors d'un incident lié à la réalisation d'un forage. Pour cela, il faudrait que toute la profession accepte de déclarer leurs difficultés.

En déclarant l'incident et en l'analysant de façon anonyme comme le fait ce rapport, cela permettrait de faire avancer la profession mais pas seulement puisque les incidents récurrents pourraient être analysés et potentiellement évités. Cela profiterait directement à l'entreprise de forage puisqu'en évitant et prévoyant certaines difficultés, les coûts et les délais de réalisation d'un ouvrage seraient amoindris.

Un contrôle accru des bonnes pratiques de réalisation d'un forage, additionné à des qualifications spécifiques au forage d'eau, semble aussi être une solution afin de garantir des forages dans les règles de l'art. Cela devra passer par une collaboration étroite entre les différents acteurs qui participent à la réalisation d'un forage.

Bibliographie

Association Française de Normalisation (AFNOR). *Forage d'eau et de géothermie – Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisées par forages*. Norme française NF X 10-999, Septembre 2014 : indice de classement X 10-999. 72 p.

BARRAS, A-N. (2015). Journée CFGI « La géothermie de minime importance » Sinistres liés aux sondes géothermiques investigations géologiques. BRGM, 30 p. Format PDF. Disponible sur : <http://tinyurl.com/h5ab4vl>. (Consulté en 03/2016).

BART, S. (2011). *Recommandations sur le choix des équipements de forages d'eau. Rappel des bonnes pratiques*. Johnson Screens, 11 p. Format PDF. Disponible sur : <http://tinyurl.com/zgwbjr8>. (Consulté en 02/2016).

BART, S. (2009). *Les formes de corrosion en forage d'eau*. Johnson Screens, 16 p. Format PDF. Disponible sur : <http://tinyurl.com/hq2zxp>. (Consulté en 02/2016).

BEZELGUES-COURTADE, S et DURST, P. (2012). Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les aquifères-synthèse bibliographique. Rapport BRGM/RP-59837-FR. BRGM, 129 p. Format PDF. Disponible sur : http://www.onema.fr/IMG/pdf/2012_028-2.pdf. (Consulté en 02/2016).

BOART LONGYEARTM. (2012). Foreuse sonique LSTM600 ; Présentation du produit. Format PDF. Disponible sur : <http://tinyurl.com/jgko6om>. (Consulté en 02/2016).

BRGM (2004). *Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau*. 92 p. Format PDF, travail coordonné par Albouy, L et Seguin, J, J.. Disponible sur : <http://www.loire.gouv.fr/IMG/pdf/rubrique1110.pdf>. (Consulté en 03/2016).

BRGM, Visualiseur InfoTerre. Disponible sur : <http://infoterre.brgm.fr>. (Consulté en 01/2016).

DETAY M. (1993). *Le forage d'eau ; réalisation, entretien, réhabilitation*. MASSON, Paris, 380 p.

DPMF. (2009). Système ODEX. Disponible sur : http://www.dpmf.fr/Produits/Systeme_ODEX.html. (Consulté en 02/2016).

- GUTIERREZ, A. (2010). Calcul de la cimentation. BRGM, Orléans. Format XLS. Extrait de la formation « Le forage d'Eau, Aspects techniques et Règlementaires ». BRGM-Formation
- HOUBEN, G. et TRESKATIS. C. (2007). Water Well ; Rehabilitation and reconstruction, Mc Graw Hill, 391 p.
- JOHNSONS SCREENS. (2011). *Mise en œuvre du massif filtrant*. Johnson Screens, 11 p.
- JOHNSONS SCREENS. (2013). Les media filtrants en forage. Johnson Screens, 10 p.
- LAUGA, R. (1990). *Pratique du forage d'eau et utilisation des crépines en génie civil et en forages profonds*. Seesam Edition, Paris.
- LAMOTTE C et BONHOMME B. (2003). Notice de contrôle et de fermeture des puits de forages. Rapport BRGM/RP-52353-R. BRGM, 16 p. Disponible sur : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52353-FR.pdf>. (Consulté en 04/2016).
- MABILLOT, A. (2005). Le Forage d'Eau. Guide pratique. Johnson Filtration Systems, Naintré, 238 p.
- MEHMERT, M. Production Water-Well Design. In : STERRETT, R. J. (2007). Groundwater & Wells. Johnson Screens, third edition, New Brighton, MN, pp. 353 – 438.
- PERSON, J. 1980. *Le forage d'eau. Guide pratique des maîtres d'ouvrages*. Edition BRGM, Orléans, 45 p. Format PDF. Disponible sur : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/80-SGN-159-HYD.pdf>. (Consulté en 04/2016).
- SCHNIEDERS, J. W. In : STERRETT, R. J. (2007). Groundwater & Wells. Johnson Screens, third edition, New Brighton, MN, pp. 597 – 628.
- SOLAGES, S. 1979. *Calcul des ouvrages de captage. Choix et caractéristiques des colonnes de captage*. Edition BRGM, Orléans, 106 p. Format PDF. Disponible sur : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/79-SGN-727-HYD.pdf>. (Consulté en 02/2016).
- SOURISSEAU B., DAUM J. R., LONGIN G. (1998). Guide de bonne pratique et de contrôle des forages d'eau pour la protection de l'environnement. Manuels et méthodes N° 31. Editions BRGM, Orléans, 82 p.

Présentation de l'entreprise

Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières)¹ est un service géologique national français créé en 1959. Il s'agit d'un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol.

Les objectifs majeurs sont les suivants :

- comprendre les phénomènes géologiques et les risques associés,
- développer des méthodologies et des techniques nouvelles,
- produire et diffuser des données pour la gestion du sol, du sous-sol et des ressources,
- mettre à disposition les outils nécessaires à la gestion du sol, du sous-sol et des ressources, à la prévention des risques et des pollutions, aux politiques de réponse au changement climatique.

Les actions du BRGM s'articulent autour de quatre missions :

- la recherche scientifique qui a pour objectif la connaissance géologique et la compréhension des phénomènes liés au sol et au sous-sol. Cela dans le but de répondre aux défis des changements globaux,
- l'appui aux politiques publiques qui regroupe l'ensemble des actions d'expertise, de surveillance et d'étude menées en soutien des politiques publiques,
- la coopération internationale avec plus de deux-cent projets chaque année dans trente-cinq pays, le BRGM intervient à l'international pour la protection durable des populations et des ressources,
- la sécurité minière confiée par l'État, depuis 2006, afin d'effectuer la surveillance et la réalisation des actions de prévention des pollutions et des risques des anciens sites miniers. Le BRGM est maître d'ouvrage délégué pour les travaux de mise en sécurité.

Le BRGM développe une expertise dans le secteur de la gestion des ressources, de la maîtrise des risques et des écotechnologies innovantes. Cette activité s'articule en dix grands domaines des géosciences afin de répondre aux différents enjeux industriels et sociétaux : la géologie, les ressources minérales, la géothermie, le stockage géologique du CO₂, les risques, l'après-mine, l'eau, l'environnement et écotechnologies, les laboratoires et expérimentation, les systèmes d'information.

¹ Source : <http://www.brgm.fr/brgm/le-brgm-service-geologique-national/brgm-service-geologique-national>