



REVUE TECHNIQUE

RÉALISATION ET RÉHABILITATION DE FORAGES
DANS LES CONDITIONS DU TERRAIN



CICR



CICR

Comité international de la Croix-Rouge
19, avenue de la Paix
1202 Genève, Suisse
T +41 22 734 60 01 F +41 22 733 20 57
E-mail: shop@icrc.org www.icrc.org
© CICR, mars 2012

Photo de couverture: Thomas Nydegger/CICR

REVUE TECHNIQUE

**RÉALISATION ET RÉHABILITATION DE FORAGES
DANS LES CONDITIONS DU TERRAIN**

Crédits

Consallen Group Sales Ltd : fig. 4

Dando Drilling Rigs : fig. 7

GeoModel, Inc. : fig. 18

Geovision : fig. 19

Andrea Guidotti/CICR : fig. 9 (haut)

Los Alamos National Laboratory : fig. 8 (droite)

Thomas Nydegger/CICR : couverture, résumé, fig. 6

OFI Testing Equipment, Inc. : 11

PAT-DRILL : fig. 5

Sameer Putros/CICR : fig. 8 (gauche), fig. 9 (bas)

D. Soulsby/CICR : figs 1, 2, 3, 10, 12-17, 20, annexe 3

PRÉFACE

Cette revue technique présente et résume une quantité impressionnante d'expériences pratiques dans le domaine de la réalisation et de la réhabilitation des forages.

David Soulsby – auteur de cette publication et géologue/géophysicien/hydraulicien expérimenté – trouve le bon équilibre entre les connaissances théoriques et pratiques, tout en adoptant l'approche d'un spécialiste/praticien. Il ne fait aucun doute que son travail sera très utile aux ingénieurs « eau et habitat » du CICR qui se trouvent face à des dilemmes techniques dans les conditions difficiles du terrain.

Cependant, l'expérience du CICR sur le terrain révèle qu'il n'existe pas de réponse simple dans les régions en situation de stress hydrique qui sont, de plus, touchées par des conflits armés ou des tensions croissantes. Ceci dit, il est possible de faire bénéficier la population de projets d'approvisionnement en eau durables quand une solution d'un bon rapport coût-efficacité est intégrée dans une analyse globale plaçant la dignité et les besoins de la communauté au centre, tout en répondant à des préoccupations environnementales plus générales.

Cette publication est une contribution importante aux efforts que déploie l'Unité eau et habitat pour promouvoir de bonnes pratiques sur le terrain parmi son personnel et les autres acteurs humanitaires.

Je suis extrêmement reconnaissant à deux hydrogéologues en chef successifs, M. Jean Vergain, qui a lancé ce projet très utile, et M. Thomas Nydegger, qui a fourni des conseils précieux tout au long de l'édition de la présente revue. Enfin, je tiens également à remercier à M^{me} Anna Taylor, relectrice de la version anglaise, qui a fait des remarques constructives et a structuré la version finale du manuscrit.

Robert Mardini

Chef de l'Unité eau et habitat

ABRÉGÉ

Les forages sont l'un des meilleurs moyens d'obtenir de l'eau potable sur le terrain. La construction et la réparation de ces forages demandent des connaissances spécialisées et des compétences techniques qui peuvent en grande partie être tirées d'ouvrages courants. Cependant, les opérations de terrain dans des zones reculées ou dans des conditions difficiles exigent souvent de la flexibilité et de l'imagination pour éviter et résoudre les problèmes techniques. Cette revue est destinée à faciliter la prise de décision lorsqu'il s'agit de choisir les méthodes de forage ayant le meilleur rapport coût-efficacité, et de décider s'il faut réaliser de nouveaux forages ou réhabiliter les forages existants. Le résultat final devrait être une installation d'un bon rapport coût-efficacité capable de fournir de l'eau potable pendant de nombreuses années.



TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	3
ABRÉGÉ	4
GLOSSAIRE	9
1. INTRODUCTION ET RÉSUMÉ ANALYTIQUE	13
2. EAUX SOUTERRAINES ET AVANTAGES DES FORAGES	17
2.1 Exploitation des eaux souterraines	18
2.1.1 Contraintes géologiques	18
2.1.2 Positionnement des forages	20
2.1.3 Types de formation géologique	21
2.2 Extraction d'eaux souterraines	23
2.2.1 Avantages des forages	24
2.2.2 Désavantages des forages	25
3. MÉTHODES DE FORAGE	27
3.1 Méthodes de forage courantes	28
4. MATÉRIEL DE FORAGE	33
4.1 Choix d'une foreuse	34
4.1.1 Forage par battage (câble)	34
4.1.2 Matériel lourd de forage par battage (câble)	35
4.1.3 Forage rotary	35
4.2 Composants de la foreuse	38
4.2.1 Trépan et tricône	38
4.2.2 Marteau fond de trou (MFT)	38
5. CONSTRUCTION DE FORAGES	41
5.1 Facteurs à prendre en considération pour la construction	42
5.1.1 Forage rotary à la boue	45
5.1.2 Forage rotary à l'air comprimé	52
5.2 Relevé de log de forage	55

6. DIMENSIONNEMENT, DÉVELOPPEMENT ET FIN DU FORAGE	59
6.1 Dimensionnement du forage	60
6.1.1 Tubage du forage	61
6.1.2 Crépines des forages	62
6.1.3 Massif filtrant	65
6.1.4 Choix de la pompe	68
6.1.5 Étanchéité du forage	70
6.1.6 Exemples de forages	70
6.2 Développement du forage	73
6.2.1 Méthodes de développement	75
6.3 Finitions du forage	79
6.3.1 Avant-puits	79
6.3.2 Pompes et essais de pompage	80
6.3.3 Diagraphie géophysique	87
7. FRAIS DE FORAGE ET DE CONSTRUCTION	89
7.1 Achat d'une foreuse	92
7.2 Taux de réussite	93
8. DÉTÉRIORATION DES FORAGES	95
9. SUIVI DU FORAGE	99
10. RÉHABILITATION DES FORAGES	103
10.1 Quand réhabiliter	104
10.2 Méthodes de réhabilitation	105
10.2.1 Inspection à l'aide d'une caméra en circuit fermé	106
10.2.2 Dissolution des dépôts et des incrustations	107
10.2.3 Retubage	110
10.2.4 Stérilisation des forages	113
10.2.5 Essai de pompage par paliers de débit	113
10.2.6 Réparation mécanique	114
11. COLLABORATION AVEC LES ENTREPRENEURS	115
11.1 Choix d'une entreprise	116
11.2 Contrats	117
ANNEXES	
Annexe 1: Exemple de log de forage	121

Annexe 2: Devis récents pour tubes et crépines	122
Annexe 3: Exemples de forages (pas à l'échelle)	124
Annexe 4: Exemple de fiche de données d'un essai de pompage	126
Annexe 5: Contrat de forage de base: clauses et prescriptions	128
Annexe 6: Liste des points d'une fiche de travail/liste de prix destinée à l'entrepreneur	133
Annexe 7: Références de produits et lectures approfondies	135
INDEX	137

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Porosité et perméabilité typiques de différents matériaux rocheux (plusieurs références)	19
Tableau 2: Comparaison des méthodes de forage	32
Tableau 3: Rotary à la boue: débit du fluide de forage pour des trépan et tiges de forage de tailles diverses	52
Tableau 4: Forage rotary à l'air: taille maximale du trépan en fonction de la puissance du compresseur et du diamètre de la tige de forage	53
Tableau 5: Valeurs types de la résistance à l'écrasement du tubage	61
Tableau 6: Ouverture minimum des crépines en fonction du débit de pompage	64
Tableau 7: Choix des crépines et des massifs filtrants pour diverses conditions	69
Tableau 8: Quantité de produit chloré nécessaire pour produire une solution de 50 mg/l dans 20 mètres de tubage rempli d'eau	87
Tableau 9: Suivi du forage: symptômes, causes et solutions	101

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Scénario hydrogéologique hypothétique	21
Figure 2: Machine de forage rotary à la boue, dans l'est du Zimbabwe, 1996. Remarquez les fosses à boue creusées à proximité	31
Figure 3: Machine de forage rotary à l'air en fonctionnement, Afrique du Sud, 1989	31
Figure 4: La machine de forage au câble Forager 55 en action	34

Figure 5: Une foreuse PAT 301	36
Figure 6: PAT 401 du CICR en action dans le nord de l'Ouganda, 2008	37
Figure 7: La foreuse Watertec 24 de l'entreprise Dando	38
Figure 8: Deux types courants de trépan: à gauche, deux trilames, à droite un tricône	38
Figure 9: MFT à pastilles de carbure de tungstène. Le corps du marteau, dans lequel il glisse, n'apparaît pas	39
Figure 10: Coupe schématique d'un forage temporaire terminé (pas à l'échelle)	43
Figure 11: Le viscosimètre « entonnoir de Marsh ». En haut: vue d'un filtre intégré à l'entonnoir. En bas: mesure graduée en plastique de 1000 ml qui porte également la marque du quart (946 ml)	48
Figure 12: Plan schématique montrant des fosses à boue et le circuit de la boue (flèches blanches tournant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre). Pas à l'échelle	51
Figure 13: Écoulement de l'eau à travers une crépine avec fil de fer profilé en V	65
Figure 14: Fermeture du fond d'un tubage en tôle au moyen de la soudure en « dents de scie ». Longueur typique des dents: 0,5 à 1 m	71
Figure 15: Mesure du débit de purge d'un nouveau forage	77
Figure 16: Installation d'essai de pompage typique (avec pompe électrique immergée). Pas à l'échelle.	82
Figure 17: Machine pour essai de pompage consistant en une pompe à rotor (Mono) actionnée par une courroie, Zimbabwe	83
Figure 18: Dommages au tubage tels qu'ils apparaissent filmés par une caméra en circuit fermé	106
Figure 19: Caméra en circuit fermé pour forage	106
Figure 20: Réhabilitation d'un forage par <i>air lift</i>	111

GLOSSAIRE

Altéré	Se dit d'une roche, de terre ou d'un contenu minéral qui a subi une décomposition provoquée par l'exposition directe à l'atmosphère, l'eau, la lumière, le gel ou la chaleur ¹ .
Aquifère	Formation souterraine, poreuse et perméable, qui contient de l'eau. Un aquifère possède les caractéristiques suivantes : il stocke de l'eau en quantité intéressante et permet sa circulation.
<i>captif</i>	Aquifère limité par des roches ou des couches de sédiments imperméables où l'eau circule sous pression. La pression de l'aquifère n'est pas nécessairement suffisante pour en faire un « puits artésien jaillissant » (où le niveau piézométrique est supérieur au niveau du sol) ¹ .
<i>libre</i>	Aquifère qui n'est pas recouvert par une formation rocheuse imperméable. L'eau de cet aquifère est soumise à la pression atmosphérique. Ce type d'aquifère est généralement rechargé par les précipitations qui tombent sur son bassin versant ou par l'infiltration d'un cours d'eau ¹ .
<i>perché</i>	Généralement, aquifère libre reposant sur une couche imperméable de taille limitée, entouré par des formations perméables ou surmontant un autre aquifère libre.
Eaux souterraines	Eaux qui se trouvent dans la zone saturée. Les eaux souterraines s'écoulent lentement en suivant la pente de la surface.

1 Adapté de « Geology dictionary », <http://geology.com> (traduction CICR).

Formation	Unité rocheuse latéralement continue possédant un ensemble typique de caractéristiques qui permet de la distinguer d'une autre et de la cartographier. Unité rocheuse de base de la stratigraphie ¹ .
<i>Formation aquifère</i>	Formation rocheuse contenant de l'eau. Ensemble, la roche et l'eau forment l'aquifère.
Fracture	Toute zone locale de séparation ou de discontinuité dans une formation géologique, telle que joint ou diaclase, qui divise la roche en deux parties ou plus. Les fractures sont généralement causées par une tension mécanique supérieure à la résistance de la roche ² .
Grès	Roche sédimentaire composée de particules de la taille des sables (1/16 à 2 millimètres de diamètre) et consolidée par un ciment (calcite, argile, quartz) ¹ .
Igné	Formé par la cristallisation de magma ou de lave.
Imperméable	Une couche imperméable est une couche de roche compacte ou de sédiments fins qui ne laisse pas passer l'eau. Cela peut être dû à un manque de pores, à l'absence de connexions entre les pores ou à leur taille si petite que les molécules d'eau ont du mal à passer ¹ .
Joint/Diaclase	Fracture dans la roche le long de laquelle il n'y a pas eu de déplacement ¹ .
Lithologie	Étude et description des roches, notamment de leur composition minéralogique et de leur texture. Terme surtout utilisé pour désigner les caractéristiques de la composition et de la texture d'une roche ¹ .
Métamorphique	Se dit d'une roche dont le contenu minéral, la texture et la composition ont été altérés par l'exposition à la chaleur, à la pression et aux effets chimiques, généralement lors d'un enfouissement tectonique et/ou d'une activité magmatique ¹ .

Mudstone	Roche sédimentaire composée de particules de la taille des argiles mais n'ayant pas la structure stratifiée caractéristique du schiste argileux ¹ .
Non consolidé	Mal ou pas du tout cimenté (en référence aux sédiments).
Oued	Cours d'eau qui se remplit après des précipitations mais qui est généralement à sec le reste du temps.
Perméabilité	Mesure de la capacité de transport de l'eau d'un matériau. Les matières telles que le gravier, qui transmettent l'eau rapidement, ont une forte perméabilité, tandis que celles, comme le schiste argileux, qui conduisent mal l'eau, ont une valeur faible. La perméabilité est principalement déterminée par la taille des pores et leur degré d'interconnexion. Elle est mesurée en unités de vitesse, par exemple en centimètres par seconde ¹ .
Pores	Interstices dans une roche, comprenant les espaces entre les grains, les fractures et les cavités.
Porosité	Volume relatif des pores dans une roche, des sédiments ou de la terre, généralement exprimée en pourcentage ¹ .
Schiste argileux	Roche sédimentaire en couches fines, formée de minuscules particules sédimentaires de la taille des argiles.
Socle	Roche solide présente sous tout sol, sédiment ou autre couche superficielle, qui affleure parfois à la surface ¹ .

Les encadrés bleus présentent des expériences du terrain ou des suggestions pratiques.

Les encadrés bruns contiennent des informations essentielles à la réussite des opérations ou à la sécurité du personnel.

1. INTRODUCTION ET RÉSUMÉ ANALYTIQUE

Le Comité international de la Croix-Rouge (CICR) est une institution humanitaire impartiale, neutre et indépendante. Elle a pour mission de protéger la vie et la dignité des victimes de guerres et de conflits internes et de leur prêter assistance. Par l'intermédiaire de son Unité eau et habitat, le CICR fournit des services d'approvisionnement en eau et d'assainissement dans des dizaines de pays et zones de conflit dans le monde, répondant aux besoins de millions de personnes. L'Unité eau et habitat a réalisé ou réhabilité des centaines de forages, parfois en faisant appel à des entrepreneurs, parfois en utilisant ses propres machines.

Cette revue technique est destinée aux coordonnateurs de projets, aux hydrauliciens et aux techniciens. Elle vise à aider chacun, des planificateurs dans les bureaux au personnel sur le terrain, à prendre des décisions techniquement correctes et d'un bon rapport coût-efficacité lorsqu'il faut réaliser ou réhabiliter des forages. Nous avons tenté d'orienter le contenu vers des problèmes qui pourraient se présenter sur le terrain, mais il était nécessaire d'inclure certaines informations théoriques, car les ingénieurs en auront besoin pour travailler. Les auteurs espèrent avoir trouvé le bon équilibre entre la pratique et la théorie, une combinaison nécessaire pour les hydrauliciens professionnels.

Cette revue commence, dans les sections 2 à 4, par un aperçu des avantages qu'il y a à utiliser les eaux souterraines et un examen des diverses méthodes de forage, en comparant les techniques et en fournissant des détails sur le matériel de forage associé à chacune d'entre elles, afin d'aider les utilisateurs à choisir l'équipement adéquat.

Cet ouvrage se concentre sur le forage rotary à la boue et à l'air, car ce sont les méthodes de forage les plus souvent utilisées sur le terrain. Les sections 5 et 6 fournissent des détails sur la construction, le dimensionnement et le développement des forages à l'aide de ces deux méthodes. Les coûts de construction sont étudiés à la section 7, tandis

que les sections 8 et 9 portent sur les principales causes de la détérioration des forages et sur les questions de suivi et d'entretien. Lorsque la détérioration du forage est telle que la production d'eau est fortement entravée, la réhabilitation devient inévitable : ce point est abordé à la section 10. Enfin, la section 11 traite des problèmes qui peuvent survenir en cas de collaboration avec des entrepreneurs et de la façon de réduire au minimum l'imprévisibilité de cet aspect du forage.

2. EAUX SOUTERRAINES ET AVANTAGES DES FORAGES

La possibilité d'accéder facilement à une eau potable sans danger est un besoin fondamental de l'être humain, dont dépendent la santé et la qualité de vie. Une telle affirmation est de nos jours une évidence, mais il convient de dire que malgré la prévalence croissante des pénuries d'eau dans le monde, un approvisionnement fiable en eau va encore de soi, sans que l'on pense vraiment à sa durabilité ou à sa qualité. Cette attitude est particulièrement manifeste dans les zones qui dépendent d'eau tirée des forages, dont la production continue et éternelle – au même rythme – est tenue pour acquise. Comme les eaux souterraines sont invisibles, on y pense rarement, mais c'est l'une des meilleures sources d'eau que l'homme peut utiliser.

Même si l'eau ne coule pas à l'air libre dans un oued asséché, il est possible qu'elle s'écoule lentement à travers les sédiments sans qu'on la voie, et qu'on puisse y accéder en creusant un puits dans le lit de la rivière – ce que savent très bien de nombreux éléphants.

2.1 Exploitation des eaux souterraines

La principale recharge des eaux souterraines est l'eau de pluie. Si les conditions le permettent, une partie de la pluie qui tombe au sol percolera dans un aquifère. Une grande partie des précipitations ruisselle vers les cours d'eau et les rivières, mais ceux-ci sont eux aussi souvent directement connectés à un aquifère local. En fait, dans les zones arides ayant des cours d'eau éphémères, le niveau élevé des eaux souterraines peut permettre d'entretenir l'écoulement de surface le long de réseaux hydrographiques.

Il est évident qu'un trou creusé ou foré dans une «éponge» saturée libérera l'eau qu'elle contient. Celle-ci peut être aspirée ou pompée et, si tout va bien, de l'eau pénétrera dans le trou pour remplacer celle qui a été retirée. C'est le principe de base des forages d'eau.

2.1.1 Contraintes géologiques

L'écorce terrestre est souvent comparée à une éponge, car elle peut absorber et retenir l'eau dans ses pores, ses fractures et ses cavités. Cette capacité de stocker l'eau dépend fortement des conditions géologiques et de la formation. Par exemple, un granite non altéré, sain, massif – roches cristallines – ne possède pratiquement pas d'espace pour

stocker l'eau, alors que le gravier de rivière non consolidé ou meuble et le calcaire karstique très altéré peuvent emmagasiner une grande quantité d'eaux souterraines et les libérer relativement facilement. Le grès et le *mudstone* peuvent contenir une quantité considérable d'eaux souterraines, mais comme la taille de leurs grains – et donc leur porosité – est différente, ils ne les libéreront pas au même rythme. L'un peut constituer un bon aquifère et l'autre pas. Le rythme auquel l'eau s'écoule dans une formation dépend de la perméabilité de cette formation, qui est déterminée par la taille des pores et des interstices et leur degré d'interconnexion. Il ne faut pas confondre la perméabilité et la porosité : la porosité est le rapport entre le volume des pores/interstices et le volume total de la roche (généralement exprimé en pour cent). Le tableau 1 présente la porosité et la perméabilité de profils de sol courants.

Les trois principales caractéristiques des aquifères sont la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement et la capacité de stockage. La transmissivité est un moyen d'exprimer la perméabilité, c'est-à-dire la vitesse à laquelle l'eau peut s'écouler à travers la structure de l'aquifère. Le coefficient d'emmagasinement et la capacité de stockage expriment le volume d'eau qu'un aquifère peut produire.

Tableau 1. Porosité et perméabilité typiques de différents matériaux rocheux (plusieurs références)

Lithologie	Porosité (%)	Perméabilité (m/jour)
Argile	42	10^{-8} - 10^{-2}
Limon/sable fin	43-46	10^{-1} -5
Sable moyen	39	5-20
Sable grossier	30	20-100
Gravier	28-34	100-1000
Grès	33-37	10^{-3} -1
Carbonate (calcaire, dolomie)	26-30	10^{-2} -1
Roches fracturées/altérées	30-50	0-300
Roches volcaniques (par ex. basalte, rhyolite)	17-41	0-1000
Roches ignées (par ex. granite, gabbros)	43-45	$<10^{-5}$

L'hydrogéologie est la science des eaux souterraines, et le travail de l'hydrogéologue consiste à évaluer les ressources en eaux souterraines d'une zone donnée. Il utilise pour cela des cartes (topographiques, géologiques), des images satellites, des photos aériennes, des observations sur le terrain (cartographie géologique, étude de la végétation, etc.), des études sur documents (documentation, rapports de terrain, etc.) et la géophysique du sous-sol. Les études de géophysique du sous-sol sont aujourd'hui très efficaces pour localiser les formations aquifères à des profondeurs pouvant atteindre 100 mètres. Les méthodes comprennent la résistivité (sondage électrique vertical), le potentiel (ou polarisation) spontané, les méthodes électromagnétiques (par ex. la méthode VLF) et magnétiques, et la micro-gravimétrie.

2.1.2 Positionnement des forages

Le choix du site de forage est une partie cruciale du processus visant à fournir un approvisionnement sûr et fiable en eaux souterraines. Les meilleurs sites sont ceux où le captage (la collecte d'eau naturelle) peut être optimisé. Ces sites ne sont pas nécessairement ceux qui reçoivent les plus fortes quantités d'eau de pluie (par ex. les bassins versants en altitude). Les « points bas » – notamment les vallées fluviales – constituent souvent des zones de captage maximal car les eaux, tant superficielles que souterraines, se dirigent vers eux sous l'effet de la gravité. Les zones fracturées, bien qu'elles ne soient pas toujours directement connectées aux points bas, peuvent aussi constituer de bons réservoirs d'eaux souterraines, et peuvent être repérées par des observations du sol ou des images satellites/photos aériennes, ainsi que par des méthodes géophysiques.

Un autre aspect de l'emplacement des forages qu'il convient d'étudier avec soin dans les zones peuplées est le risque de contamination par le bétail et les latrines ou autres installations d'évacuation des déchets. Comme les eaux souterraines proches de la surface suivent la pente, un puits peu profond ou un forage exploitant des eaux souterraines peu profondes devrait se situer aussi loin que possible – en

gardant à l'esprit que les humains doivent se trouver à proximité d'une source d'eau – et en amont des sources de pollution potentielles (latrines ou conduites d'égouts par exemple). Les aquifères captifs plus profonds limités par des couches imperméables ont moins de risques d'être contaminés par des polluants provenant de la surface. Enfin, il convient de tenir compte de la nature de l'aquifère peu profond. Si la matrice de l'aquifère est composée de sable fin ou moyen, elle constituera un filtre naturel pour les polluants particuliers, alors que le calcaire fissuré, qui a un taux élevé de transmission de l'eau (transmissivité), transportera les polluants plus rapidement et plus loin de la source. Il est estimé que la plupart des micro-organismes ne survivent pas plus de 10 jours dans les eaux souterraines.

2.1.3 Types de formation géologique

La figure 1 présente une situation géologique hypothétique où diverses sources d'eaux souterraines peuvent (ou non) être exploitées par le biais d'un puits ou de forages.

A) Aquifères perchés

Sur le site A, un puits peu profond peut produire un peu d'eau tirée d'un « aquifère perché » situé dans la zone

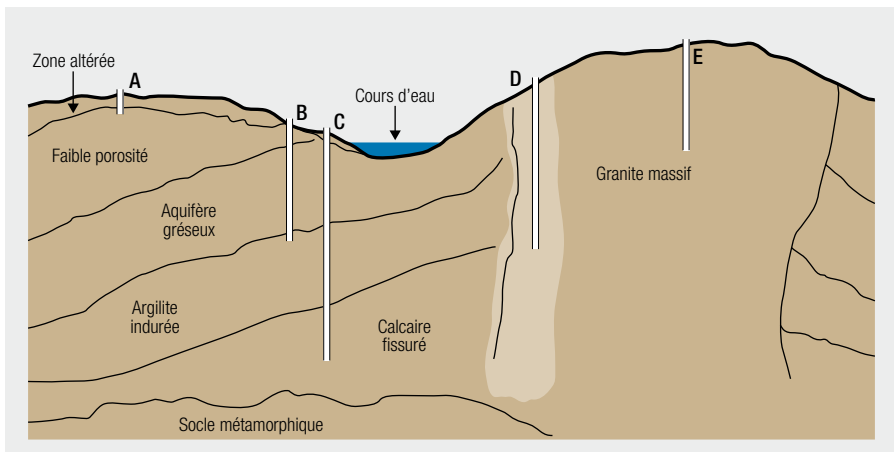


Figure 1. Scénario hydrogéologique hypothétique

altérée au-dessus de *mudstone* relativement imperméable (faible porosité). Si ce puits était prolongé dans le *mudstone*, il pourrait produire très peu d'eau supplémentaire. Un aquifère perché est généralement de taille réduite et se trouve sur une couche imperméable située au-dessus du niveau de la nappe phréatique de l'ensemble de la zone.

B) Aquifères libres peu profonds

L'adjectif « libre » désigne un aquifère dont l'eau est soumise à la pression atmosphérique. Par conséquent, en l'absence de pompage, le niveau statique de l'eau dans le forage correspond au niveau de l'eau dans le terrain. Sur le site B, un forage extrait de l'eau d'un aquifère libre gréseux, dont le niveau statique est quelque peu inférieur au niveau de l'écoulement de la rivière. Cet aquifère gréseux se trouve dans une bonne zone de captage en raison de la recharge assurée par la rivière.

C) Aquifères captifs

Un aquifère « captif » contient de l'eau souterraine sous pression. Par conséquent, lors d'un forage, le niveau statique s'élève jusqu'à un niveau supérieur au niveau de l'eau dans le terrain. Si la surface piézométrique se trouve au-dessus du niveau du sol (ce qui n'est pas rare), l'eau s'écoulera d'elle-même hors du forage : on parle alors d'eau « artésienne ». Le forage profond C coupe l'aquifère gréseux et un aquifère captif plus profond, qui se trouve dans du calcaire fissuré. En raison de la pression dans l'aquifère calcaire, le niveau statique de ce forage peut être au même niveau que dans le cas B ou à un niveau supérieur. L'aquifère calcaire peut ne pas avoir de recharge et, par conséquent, l'eau qu'il contient est là depuis longtemps ou « fossile » et finira par s'épuiser en cas d'exploitation.

D) Zone fracturée

Le forage D, réalisé dans du granite fracturé (zone claire), rencontre l'eau contenue dans la zone fracturée. Les zones fracturées se forment durant les périodes géologiques en

résultat des fortes tensions mécaniques qui s'exercent sur les formations non plastiques en raison des mouvements tectoniques.

E) Socle «hydrogéologique»

Le site E, un forage réalisé dans du granite massif au sommet d'une colline, est sec. Dans cette situation, approfondir le trou (comme dans C) dans le socle métamorphique – généralement appelé «socle hydrogéologique» ou «soubassement» – serait une perte de temps et d'argent. Le socle marque le niveau sous lequel il est peu probable de trouver de l'eau souterraine.

2.2 Extraction d'eaux souterraines

Un forage d'eau n'est pas un simple trou dans le sol. Il doit être bien conçu, construit de manière professionnelle et réalisé avec soin. Les forages destinés à l'extraction d'eau consistent essentiellement en un trou foré verticalement (les forages inclinés ou horizontaux sont rares et ne seront pas étudiés ici), un tubage solide visant à prévenir l'effondrement des parois comprenant un moyen permettant à l'eau potable d'entrer dans le forage (crépine), une protection à la surface et un dispositif d'extraction de l'eau. Le forage à la machine est un processus coûteux, et la conception et la construction des forages requièrent des compétences professionnelles. Il y a cependant des compensations : cette méthode d'extraction de l'eau a plusieurs avantages majeurs.

Les autres options courantes, à la disposition de quiconque possède quelques connaissances de base et outils simples, sont les eaux de surface, les sources et les puits ordinaires. Lorsque des eaux souterraines peu profondes émergent d'une zone de suintement ou d'une source, la construction de systèmes de captage peut permettre de fournir de l'eau d'une qualité satisfaisante. Les chambres de captage, qui comprennent des filtres faits de sable ou de pierres, et les fosses de récupération de l'eau sont extrêmement efficaces

pour recueillir l'eau. La gravité peut être utilisée pour alimenter le réseau de conduites de distribution d'eau à partir des sources d'altitude. Les puits ordinaires peu profonds exploitent généralement les eaux souterraines proches de la surface. Jusqu'à cinq mètres de profondeur, leur construction est relativement simple (à condition d'avoir du temps et de la main-d'œuvre locale motivée) et il existe de nombreuses publications décrivant ce processus. De plus, en raison de leur diamètre relativement large, les puits offrent une capacité de stockage intéressante. Les réserves d'eau peuvent être protégées en recouvrant les parois du puits, en y mettant un couvercle et en y installant une pompe à main.

Cependant, les puits ordinaires et le captage d'eaux de surface en général sont très exposés à la contamination causée par les activités agricoles, les animaux, un mauvais assainissement et les déchets. De plus, le captage d'eaux de surface ou d'eaux souterraines peu profondes est vulnérable aux faibles précipitations et aux baisses du niveau d'eau causées par les sécheresses, car il exploite généralement le haut de l'aquifère. L'eau de forage, en revanche, a rarement besoin d'être traitée et le niveau de l'eau est moins susceptible de baisser durant les périodes de sécheresse ou de faibles précipitations.

2.2.1 Avantages des forages

S'ils sont bien conçus et entretenus, les forages :

- sont moins vulnérables aux sécheresses ou aux baisses du niveau d'eau lorsqu'ils atteignent des formations aquifères profondes ;
- peuvent être conçus de façon à exploiter plus d'un aquifère (quand les aquifères se trouvent sur une ligne verticale et que l'eau ne peut pas circuler de l'un à l'autre) ;
- sont moins susceptibles de s'effondrer ;
- sont moins vulnérables à la contamination ;
- peuvent, si leur emplacement est bon, produire de grandes quantités d'eau et permettent donc d'utiliser des pompes mécaniques ou électriques ;

- peuvent faire l'objet d'un suivi et de tests quantitatifs, ce qui permet d'évaluer avec précision les paramètres de l'aquifère (comme lors de la modélisation d'aquifères), le rendement, ainsi que le dimensionnement optimal de la pompe et des systèmes de stockage et de distribution ;
- peuvent servir à surveiller le niveau des eaux souterraines à d'autres fins, par exemple pour des études sur l'environnement ou l'évacuation des déchets.

2.2.2 Désavantages des forages

- Le coût initial élevé du matériel et l'apport de compétences spécialisées, c'est-à-dire que la construction, le fonctionnement et l'entretien peuvent requérir un certain savoir-faire et un équipement lourd et coûteux.
- Ils subiront une détérioration naturelle irréversible s'ils ne sont pas bien suivis et entretenus.
- Ils sont vulnérables au sabotage et peuvent être irréparablement détruits sans beaucoup d'efforts s'ils ne sont pas bien protégés.
- Ils requièrent une source d'énergie si des pompes d'extraction de l'eau sont utilisées (par opposition aux systèmes utilisant la gravité).
- Ils ne permettent pas d'accéder directement, pour l'entretien ou les réparations, aux parties construites qui se trouvent sous terre.

3. MÉTHODES DE FORAGE

Une fois que le choix s'est fixé sur un site adéquat et que le forage a été décidé, il convient de choisir la bonne méthode de forage.

Un autre élément crucial à prendre en compte dans la planification du projet est l'existence préalable de sources et de points d'eau. Il est possible que la zone contienne déjà des puits ordinaires et des forages. Sont-ils utilisés ? Si non, peuvent-ils être réhabilités afin d'accroître la quantité d'eau disponible ou de réduire le coût du programme ? Le matériel de forage, notamment les compresseurs, peut être utilisé pour remettre en état les forages désaffectés. La question de la réhabilitation sera abordée à la section 10 du présent ouvrage, tandis que celle-ci s'intéresse aux facteurs qui doivent être pris en considération lors du choix de la méthode de forage.

3.1 Méthodes de forage courantes

Une foreuse consiste essentiellement en un mât qui, dans la plupart des cas, conduit les composants du train de tiges (outils et tiges ou câble de forage) qui y sont suspendus. Les systèmes modernes sont électriques, utilisant le système rotatif, mais il vaut probablement la peine de faire une brève digression pour décrire quelques méthodes de forage manuel. Les méthodes simples et bon marché comprennent :

A) Le forage à la tarière manuelle

Les tarières manuelles s'opèrent à la force des bras. Elles s'enfoncent dans le sol par mouvement rotatif de l'outil et font remonter les matériaux le long d'une vis sans fin ou dans un « godet » (tarière à godet). Les matériaux doivent être excavés et le forage poursuivi jusqu'à la profondeur voulue. Le forage à la tarière manuelle est lent et limité à une profondeur d'environ 10 mètres (au maximum 20 mètres) dans des dépôts non consolidés (pas plus grossiers que le sable), mais c'est un procédé simple et bon marché.

B) Forage au jet

Méthode consistant à injecter de l'eau dans un train de tiges d'où elle émerge en un jet qui fend la formation. Le forage peut être facilité en faisant tourner le jet ou en le déplaçant de haut en bas dans le trou. Les déblais sont évacués hors du forage par l'eau qui circule. Cette méthode, elle aussi, n'est utile que dans les formations non consolidées et seulement pour des profondeurs relativement faibles. Le forage doit être interrompu s'il rencontre un bloc rocheux.

C) « Sludging »

Cette méthode, qui peut être décrite comme l'inverse du forage au jet, requiert un tuyau (un bambou a été utilisé avec succès) qu'on introduit dans le trou et qu'on bouge de haut en bas, éventuellement à l'aide d'un bras de levier. Une valve anti-retour (on peut obtenir le même effet en obturant l'extrémité supérieure du tuyau avec la main) assure le pompage tandis que de l'eau est versée dans le trou et remonte (avec les débris) dans le tuyau. L'extrémité du tuyau peut être munie de simples dents métalliques, et un petit réservoir situé en haut du trou permet de remettre l'eau en circulation. Les limites de cette technique sont semblables à celles des deux autres méthodes, mais elle a été utilisée avec succès au Bangladesh.

Ces techniques manuelles de forage à faible profondeur peuvent être utilisées comme options bon marché lors de la recherche d'eaux souterraines pour des puits ordinaires, en particulier si les études géophysiques sont inefficaces, indisponibles ou impraticables en raison des conditions du sol. Lorsque le forage est réalisé uniquement à des fins de prospection, de petits trous forés rapidement suffisent.

D) Forage par battage (forage à percussion)

Le forage par battage consiste simplement à faire tomber un outil coupant d'au moins 50 kg de façon répétée dans le trou. Il s'agit peut-être de la plus ancienne méthode de

forage de puits, introduite par les Chinois (qui utilisaient probablement des bambous) il y a 3000 ans ou plus. Les outils de forage sont normalement suspendus par une corde ou un câble et – en fonction du poids du train de tiges qui, en cas de manipulation manuelle, est forcément limité – il est possible de forer jusqu'à une profondeur considérable dans des formations meubles ou dures. Les méthodes de base de forage par battage sont encore beaucoup utilisées au Pakistan pour forer des trous peu profonds pour les pompes à main. Elles requièrent un trépied d'acier solide (chèvre), un câble et son treuil, une masse de battage et un outil de battage et de curage (cuillère). Cette technique est nettement moins efficace quand le sol est dur et que le matériel risque de dévier accidentellement vers les zones plus meubles, ce qui peut entraîner une déviation du forage ou l'enrayage des outils. Les sols non consolidés, bien qu'ils soient faciles à forer avec un outil de forage par battage, peuvent présenter de nombreux obstacles s'ils contiennent des blocs rocheux. Le schiste argileux collant et les argiles sont en outre difficiles à pénétrer avec des machines de forage par battage et le sable meuble tend à s'effondrer dans le trou presque aussi rapidement qu'il peut en être extrait.

E) Forage rotary et marteau fond de trou

Pour la plupart des forages sur le terrain, il faudra utiliser le forage rotary. Les techniques de forage rotary proprement dites permettent de réaliser des forages beaucoup plus profonds et utilisent des fluides de forage pour refroidir et lubrifier les outils de coupe et évacuer les débris du trou. Les fluides se présentent généralement sous forme d'air comprimé ou d'eau, contenant des additifs tels que boues ou mousses de forage commerciales (voir section 5). Le marteau fond de trou (MFT) est un développement ultérieur de la technique rotary.



Figure 2. Machine de forage rotari à la boue, dans l'est du Zimbabwe, 1996.
Remarquez les fosses à boue creusées à proximité



Figure 3. Machine de forage rotari à l'air en fonctionnement, Afrique du Sud, 1989

Tableau 2. Comparaison des méthodes de forage

	Avantages	Désavantages
Construction manuelle (Puits ordinaires et forage manuel)	Technique simple utilisant de la main-d'œuvre bon marché	Faibles profondeurs seulement
Forage par battage	Foreuses simples, fonctionnement bon marché	Lent, faibles profondeurs seulement
Forage rotary, à la boue	Forage rapide, pas de limite de profondeur, pas besoin de tubage provisoire	Fonctionnement coûteux, peut nécessiter beaucoup de place pour la foreuse et les fosses à boue et utiliser beaucoup d'eau, le « <i>mud cake</i> » peut entraver le développement du forage.
Rotary/marteau fond de trou (MFT), circulation d'air	Très rapide dans les formations dures, n'a pas besoin d'eau, pas de pollution de l'aquifère	Généralement pas utilisé dans les formations instables et meubles. Le forage en dessous du niveau de la nappe phréatique est limité par la pression hydraulique
Rotary, circulation inverse (pas décrit dans le texte)	Pas de formation de « <i>mud cake</i> », forage rapide dans les formations grossières non consolidées à des diamètres larges	Foreuses grosses et coûteuses. Peut nécessiter de grandes quantités d'eau.

4. MATÉRIEL DE FORAGE

Après avoir choisi une méthode de forage, vous devez déterminer quel est le type de matériel de forage ou de foreuse le mieux adapté à votre situation. Cette section présente les divers types de foreuses disponibles et leurs propriétés, ainsi qu'un aperçu des pièces d'une foreuse.

4.1 Choix d'une foreuse

Le choix de la foreuse peut dépendre de la géologie du site, ainsi que de la profondeur et du diamètre prévus des forages. L'accès est un facteur important. Toutes les foreuses, à l'exception des unités les plus petites, qui peuvent être démontées et assemblées sur place, doivent être transportées : il faudra donc peut-être percer une route à travers les broussailles pour atteindre un site de forage. Pour les foreuses les plus imposantes montées sur camion ou sur remorque, cela peut constituer un problème considérable durant les saisons des pluies dans les zones reculées. Il est bien connu que les foreuses lourdes s'embourbent et, dans ces conditions difficiles, on ne devrait les utiliser que si les prévisions n'annoncent pas de pluie, ou s'il existe des moyens de désembourber la foreuse. Comme les points bas constituent souvent de bons sites de forage, il se peut qu'une foreuse doive gravir une pente raide en repartant. Il faudra éventuellement recouvrir les routes de terre avec des pierres pour faciliter la traction.



Figure 4. La machine de forage au câble Forager 55 en action

4.1.1 Forage par battage (câble)

Les treuils mécaniques améliorent évidemment l'efficacité du forage par battage (machines légères de forage au câble), et plusieurs options sont possibles. Par exemple, la machine de forage Forager 55 (figure 4), montée sur remorque, ne pèse que 400 kg et peut être facilement transportée sur des sites difficiles d'accès. Une seule personne suffit pour monter le trépied et le cœur du système est un petit treuil à chute libre qui abrite et abaisse l'outil de forage. Elle peut fonctionner soit à l'énergie mécanique, soit à l'énergie hydraulique, mais le fabricant conseille de ne pas utiliser cette dernière source d'énergie à l'étranger.

Cependant, ce type de foreuse n'est pas adapté aux formations dures ou aux sédiments contenant des blocs rocheux. Dans les formations qui risquent de s'effondrer, la profondeur du forage est limitée par la force de levage de l'équipement utilisé pour récupérer le tubage provisoire qui maintient les parois du trou. L'unité et ses accessoires sont disponibles auprès de Consallen Group au Royaume-Uni (référence de produit 1, annexe 7).

4.1.2 Matériel lourd de forage par battage (câble)

Les machines lourdes de forage au câble sont montées sur des camions ou des remorques et fonctionnent à l'aide d'un grand moteur diesel qui fait tourner un tambour d'enroulement. Afin d'augmenter le poids et la puissance de forage, une masse-tige – lourde barre d'acier – est fixée au-dessus de la trousse coupante, permettant généralement d'obtenir un trou plus droit et plus vertical. Les machines de forage par battage permettent à ceux qui les manipulent de varier le nombre de coups par minute et la durée de chaque coup, afin d'optimiser la pénétration dans les formations rocheuses dures ou meubles. Si on ajoute de l'eau, les déblais sont évacués du trou sous forme de boue à l'aide d'un outil de curage (cuillère: lourd tube d'acier muni d'un clapet à l'extrémité inférieure). Les formations plus meubles et instables, comme le sable ou l'argile, peuvent nécessiter l'utilisation d'un outil creux servant à la fois au forage et à l'évacuation des débris.

Les machines de forage par battage sont rarement utilisées de nos jours pour les forages profonds. Elles sont plus utiles pour réaliser des ouvrages d'observation ou d'exploration peu profonds. Il y a quelques années, l'auteur a vu une vieille machine de forage par battage montée sur une grosse remorque, réalisant des forages d'exploration autour d'une mine de manganèse à ciel ouvert à Hotazel dans la province du Cap-Occidental en Afrique du Sud.

4.1.3 Forage rotary

Les machines de forage rotary industrielles sont montées sur camion ou remorque, mais il existe aussi sur le marché des machines petites et extrêmement puissantes (voir ci-dessous), souvent d'un bon rapport coût-efficacité pour les projets humanitaires, par exemple, la foreuse Eureka Porta-Rig, qui peut être transportée en camionnette en pièces détachées et assemblée sur place. L'unité de base pèse environ 500 kg et fonctionne à l'aide d'un moteur de 4 kw, avec une boîte de transfert et un système d'injection de boue ou d'air. Un petit compresseur de 7 bars monté sur



Figure 5. Une foreuse PAT 301

Alors qu'il utilisait une PAT 201 au Sud-Soudan pour une ONG néerlandaise, l'auteur a dû monter un support fait de trois poteaux téléphoniques (deux poteaux verticaux et une barre transversale) auquel était suspendu un palan à chaîne d'une capacité de 5 tonnes. À une ou deux reprises, le palan, tirant sur le support moteur, a pu libérer les tiges de forage et l'outil, qui s'était retrouvé bloqué quand le forage s'était effondré.

une petite remorque est disponible. L'Eureka peut atteindre une profondeur de 50 mètres (référence de produit 2, annexe 7).

Le plus petit système de forage rotary dont l'auteur ait fait l'expérience directe est la PAT 201. Ce système fonctionne à l'aide d'un petit moteur à essence installé dans un support qui peut monter et descendre le long d'un tripode. Il n'est recommandé que pour le forage rotary à la boue dans les formations alluviales, mais l'auteur peut confirmer que la PAT 201 est tout à fait capable, comme l'affirment les fabricants, d'atteindre les 60 mètres de profondeur. Cependant, elle manque de puissance pour le « retrait » (elle ne possède qu'un petit treuil manuel). C'est là le principal défaut des petites machines.

L'entreprise PAT (référence de produit 3, annexe 7) produit des foreuses de tailles diverses, petites à moyennes : les 201, 301 (voir figure 5), 401 et 501, qui utilisent toutes des tiges de forage de trois mètres. La PAT 301 et la 401 fonctionnent à l'aide d'un système hydraulique et peuvent être remorquées ou transportées à l'aide d'une petite camionnette, par exemple une Land Cruiser. Toutes les deux peuvent fonctionner avec l'injection d'eau/de boue ou d'air comprimé et atteindre une profondeur de 150 à 200 mètres avec un diamètre maximal de huit ou neuf pouces (20 à 23 centimètres). Il existe des pompes à boue pour les foreuses PAT, et des compresseurs d'une capacité maximale de 7 à 12 bars peuvent être fournis pour les plus grosses foreuses. En termes de taille et de capacité, la 501, une unité montée sur un camion de 6 ½ tonnes, se situe entre les petites machines portables et les grosses foreuses industrielles, qui sont généralement fabriquées sur commande.

Les systèmes de circulation requièrent une pompe pour faire circuler le fluide : en cas de forage rotary à la boue, une pompe à boue, et pour les systèmes utilisant de l'air, un compresseur. Il existe des unités d'une taille pratique pour les petites foreuses. Par exemple PAT fabrique une petite



Figure 6. PAT 401 du CICR en action dans le nord de l'Ouganda, 2008

pompe à boue mécanique pour les foreuses portatives 201. Les grosses foreuses utilisent des unités lourdes. Les pompes à boue peuvent être composées de pistons, de rotors ou de stators hélicoïdaux. Pour les compresseurs, les fabricants indiquent la pression qu'une unité peut atteindre en « bars » ou en « psi » (*pounds per square inch* – livre par pouce carré), où 1 bar = 100 kPa, (1 Pa = 1 N/m²). Les unités lourdes peuvent atteindre une pression de 20 bars – et c'est la pression qui donne de la puissance à un marteau fond de trou (MFT) – ce qui augmente la vitesse de pénétration. La pression fait aussi remonter les déblais à la surface : par exemple, un compresseur de 7 bars serait nécessaire pour faire monter une colonne d'eau de 60 mètres depuis le fond d'un trou. Comme la production d'air comprimé est un processus connu pour son inefficacité, le compresseur sera peut-être la machine la plus coûteuse et volumineuse d'une installation de forage, et celle qui pose le plus de problèmes d'entretien.

Le budget des organisations humanitaires leur permet rarement d'acheter des foreuses lourdes, mais ce sont des machines de ce type là qui seront normalement utilisées si un entrepreneur est engagé pour un projet. Les opérateurs

Inutile de préciser qu'étant donné les dangers inhérents à l'utilisation d'air sous pression, il faut que les tuyaux et les raccords soient de bonne qualité et en bon état. C'est particulièrement important lorsque l'on travaille dans des zones reculées et qu'il faut faire plusieurs heures de route pour recevoir des soins médicaux d'urgence.

De nombreux entrepreneurs construisent leurs propres machines en utilisant, par exemple, des marques particulières de châssis de camion, de moteurs ou de compresseurs pour lesquelles il est facile de se procurer des pièces détachées.



Figure 7. La foreuse Watertec 24 de l'entreprise Dando

Quiconque connaît le fonctionnement des entreprises de forage sur le terrain sait à quel point l'immobilisation d'une machine peut nuire au calendrier d'un projet. Les problèmes surviennent souvent dans les systèmes hydrauliques et les compresseurs, qui peuvent avoir été mal entretenus en raison de la pression du travail.



Figure 8. Deux types courants de trépan : à gauche, deux trilames, à droite un tricône

commerciaux peuvent acheter de grosses foreuses « clé en main » : les entreprises Atlas Copco et Dando – qui fabrique la très populaire foreuse Watertec 24 de la figure 7 – sont bien connues de nombreux foreurs et hydrogéologues. La W24, un exemple typique de ce type de machine, a une « puissance de retrait » de 24 tonnes et peut forer à plus de 700 mètres de profondeur avec un outil dont le diamètre peut atteindre 17 ½ pouces (44,45 cm). Elle a été mise au point exprès pour les conditions difficiles rencontrées en Afrique et dans les pays arabes. La W24 est l'une des nombreuses foreuses qui peuvent être adaptées à l'utilisation d'air ou de boue, en fonction des besoins.

4.2 Composants de la foreuse

4.2.1 Trépan et tricône

Aucun type de trépan n'est adapté à toutes les conditions de forage et formations possibles. La Figure 8 en présente quelques exemples typiques. Les trépan consistent en trois ou quatre lames crantées qui coupent la formation quand ils sont mis en rotation. Ils peuvent pénétrer rapidement les formations plus meubles comme l'argile peu consolidée ou dure et le *mudstone*. Les tricônes, qui peuvent être utilisés avec un système d'injection d'air ou de liquide, sont couramment employés dans l'industrie pétrolière. Ils peuvent pénétrer tant les formations meubles que des formations relativement dures.

4.2.2 Marteau fond de trou (MFT)

Comme alternative au forage rotary, si une formation est trop dure pour être pénétrée par un trépan, un marteau fond de trou (MFT) est généralement utilisé. Cet outil a été mis au point pour l'industrie minière et l'exploitation de carrières. L'extrémité mobile – le taillant à boutons – est serti de « pastilles » de carbure de tungstène hémisphériques et comprend des rainures qui permettent à l'air comprimé de s'évacuer. Lorsque le marteau est pressé contre le sol, l'air comprimé injecté dans les tiges force

l'outil à entamer un mouvement pneumatique (semblable à celui d'un marteau piqueur). Quand l'outil commence à tourner, le taillant à boutons agit sur toute la base du trou. La plupart des marteaux tournent à une vitesse de 20 à 30 tours par minute et peuvent frapper jusqu'à 4000 coups par minute. Les débris sont généralement expulsés (soufflés) hors du trou à l'extrémité de chaque tige. Les MFT sont particulièrement efficaces dans les formations rocheuses dures, comme le calcaire ou le basalte. Les formations meubles et fines tendent à boucher les conduites d'air ou à enrayer la course du piston.

Néanmoins, les MFT ont un excellent rapport coût-efficacité et sont donc très appréciés des foreurs professionnels.

Dans les zones reculées, et quand la pression du travail est forte, l'entretien du marteau peut facilement être négligé, ce qui risque de nuire au respect du calendrier d'un projet.



**Figure 9. MFT à pastilles de carbure de tungstène.
Le corps du marteau, dans lequel il glisse, n'apparaît pas**

5. CONSTRUCTION DE FORAGES

Une fois la méthode et le matériel de forage choisis, vous devrez observer et surveiller la construction du forage. Vous aurez peut-être aussi la responsabilité de superviser (en termes de contrôle de la qualité) le travail de vos collègues ou d'entreprises de forage externes. Le contrôle de la qualité des opérations de forage nécessite des connaissances et une assurance qui ne s'acquièrent que par l'expérience, mais un entrepreneur coopératif (ne vous attendez pas à ce qu'il fasse preuve de sympathie!) peut faciliter le travail, voire le rendre agréable. Cette section porte sur les facteurs clés de la construction de forages réalisés à l'aide des méthodes de forage rotary à la boue ou à l'air.

5.1 Facteurs à prendre en considération pour la construction

Les grandes foreuses sont équipées de façon à garantir que le début d'un forage soit net et vertical. Il est parfois difficile de faire en sorte que le forage reste vertical et droit durant les premières étapes, mais à mesure que le poids du train de tiges augmente ce problème tend à disparaître, à moins de conditions de forage extrêmement hétérogènes (par ex. blocs rocheux ou cavités). Il est particulièrement important que les forages d'eau soient droits s'il faut installer une longue colonne de tubage et de crépines, et un massif filtrant (voir section 6.3.2).

Les forages déviés ou inclinés sont principalement utilisés dans l'extraction pétrolière ou minière. Les outils utilisés pour les forages d'eau ne sont pas adaptés aux forages inclinés.

À mesure que le forage progresse, les tiges de forage sont vissées les unes aux autres. Il convient de relever que deux des trois outils montrés à la figure 8 ont un pas de vis conique, qui permet de fixer et d'assembler rapidement les outils et les tiges sur la foreuse. De l'air est injecté dans chaque tige afin d'éliminer les obstructions, et le train de tiges est fixé sur la foreuse à l'aide de clés de serrage.

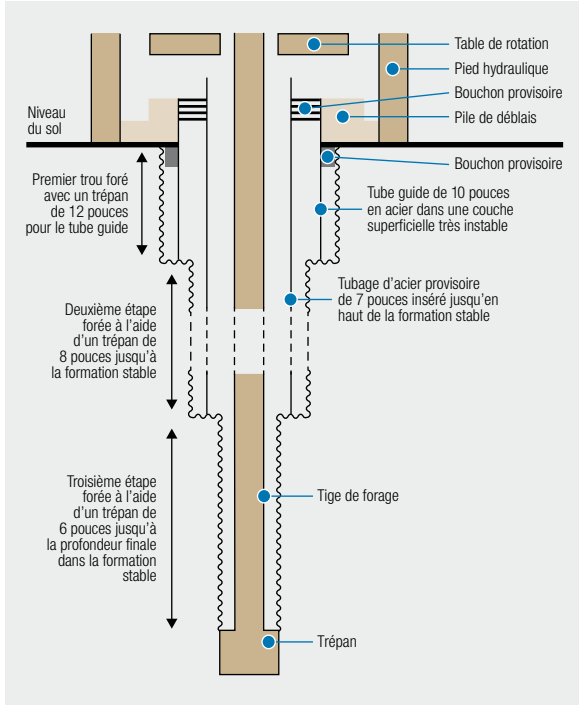


Figure 10. Coupe schématique d'un forage temporaire terminé. Pas à l'échelle.

Évidemment, les mâts de forage plus hauts pourront soutenir des tiges de forage plus longues – la longueur normale est de six mètres, sauf pour les foreuses plus petites (voir ci-dessus) –, ce qui accélère la descente et la remontée de l'outil.

L'alésage – élargissement d'un trou existant – peut être effectué soit avec un trépan quelconque, soit à l'aide d'outils spécifiques d'alésage. Les entreprises de forage conçoivent souvent elles-mêmes des outils pour des usages spécifiques, parfois sur le terrain, et elles se montrent souvent très ingénieuses.

Il convient de garder à l'esprit qu'après le début du forage, le fluide de forage et les déblais risquent de provoquer

Les objets tombés dans le trou peuvent souvent être « repêchés » à l'aide de l'équipement existant (comme le filetage des tiges) ou à l'aide d'outils expressément adaptés. Cependant les foreurs devraient toujours prendre garde à l'éviter, car des incidents mineurs peuvent avoir un coût élevé en termes de temps et d'équipement.

l'érosion des parois de la partie supérieure du forage, et donc de causer un élargissement irrégulier du trou, ce qui réduit la vitesse de remontée du fluide (air ou boue). Ce problème peut être résolu en installant un tube guide comme décrit ci-dessous.

À mesure que le forage progresse, on observera – si tout va bien – une augmentation de la quantité d'eau sortant du trou, jusqu'à ce qu'il apparaisse clairement que le forage produira la quantité requise. À ce point, il faudra peut-être quand même approfondir encore le trou afin de fournir un rabattement suffisant (voir section 6.3.2). Cependant, si un forage ne s'avère pas suffisant, il peut être préférable d'arrêter rapidement les travaux (sauf si une pompe à main peut être installée à cet endroit), à moins qu'on préfère continuer dans l'espoir de trouver plus d'eau (ici, quelques connaissances sur la géologie locale seraient très utiles). Si des fragments d'un socle cristallin dur métamorphique ou igné, telles que gneiss, schiste ou granite, commencent à apparaître dans les déblais et que la vitesse de pénétration diminue fortement, cela signifie vraisemblablement que le « socle hydrogéologique » a été atteint et qu'il serait donc sans doute inutile de continuer à approfondir le trou.

La vitesse de pénétration dans chaque zone ou formation peut être déterminée simplement en chronométrant la progression d'une tige de forage ou d'un point fixe indiqué par deux marques de craie sur les tiges quand elles traversent la table. La vitesse de pénétration peut fournir une indication du degré de consolidation ou de la dureté de la formation, et en outre indiquer précisément quand un aquifère a été traversé.

La question est donc : quand arrêter le forage ? Le responsable a normalement une idée, sur la base des prescriptions du projet, de la quantité d'eau requise d'un forage. Une pompe à main, par exemple, ne requiert pas un débit fort (un débit de 0,5 litre/seconde suffit largement), alors qu'une motopompe alimentant la citerne d'un village, d'un camp

de réfugiés ou d'une institution comme une école requiert un débit bien plus important.

Quand le responsable arrête finalement le forage (il en a généralement la responsabilité), il est conseillé d'attendre quelques minutes pour que le niveau d'eau dans le forage revienne à la normale, puis de le mesurer à l'aide d'une sonde piézométrique.

Sur le terrain, les hydrogéologues et les hydrauliciens travaillant sur des projets de forage dans les secteurs commercial ou humanitaire rencontreront le plus souvent des machines de forage rotary (de toutes tailles) utilisant l'injection de boue ou d'air comprimé. C'est pourquoi cette revue se concentre uniquement sur ces techniques : le forage rotary à la boue et à l'air comprimé, car le forage par battage, le forage à la tarière et les autres méthodes deviennent de plus en plus rares.

5.1.1 Forage rotary à la boue

En plus de refroidir et de lubrifier les trépan, comme mentionné ci-dessus, l'ajout de boues spéciales ou d'autres additifs à l'eau lors du forage dans des formations instables offre les avantages considérables suivants :

- grâce à l'utilisation de fluides d'une densité plus élevée que celle de l'eau, une pression hydrostatique considérable s'exerce sur les parois du trou, empêchant la formation de s'effondrer ;
- le liquide forme un *mud cake* qui soutient la paroi du trou, empêchant la formation de s'effondrer ;
- le liquide maintient les déblais en suspension pendant que le forage est interrompu pour ajouter des tiges de forage ;
- le liquide enlève les déblais du trépan, les transporte jusqu'à la surface et les dépose dans les fosses à boue (voir ci-dessous).

La boue de forage – une suspension partiellement colloïdale de particules ultrafines dans l'eau – remplit ces fonctions grâce à ses propriétés de vitesse, de densité, de

S'il n'est pas possible de se procurer une sonde piézométrique manufacturée, il est facile d'en fabriquer une avec environ 100 mètres de fil électrique ordinaire et un testeur électrique bon marché (avec une échelle permettant de mesurer la résistance – Ω). Connecter une extrémité du câble à l'appareil et abaisser l'autre extrémité, éventuellement lestée d'une pièce de métal, dans le forage, avec les fils à nu. Quand les fils touchent l'eau, l'appareil indique un courant électrique. À ce moment, faites une marque sur le câble, ressortez-le et mesurez la longueur du bout dénudé à la marque.

viscosité et de thixotropie (capacité de durcir lorsqu'elle n'est pas en mouvement). L'eau exerce elle-même une pression hydrostatique au fond d'un trou, mais, à des profondeurs moindres, cela ne sera peut-être pas suffisant. Le sel compte parmi les additifs les plus pratiques pour accroître la densité de l'eau, mais l'un des plus couramment utilisés est un minéral argileux naturel connu sous le nom de bentonite (montmorillonite de calcium), qui se dilate fortement dans l'eau. Une boue composée d'eau et de bentonite dans les bonnes proportions a une viscosité plus forte que l'eau et forme un *mud cake* (boue consolidée) sur les parois du trou. Cependant, elle a un grand désavantage : elle doit être préparée et reposer pendant environ 12 heures avant utilisation afin que la viscosité apparaisse.

Le mélange normal pour la boue bentonitique est de 50 kg par mètre cube d'eau (un mélange de 5 %), ou de 70 kg par mètre cube si on s'attend à rencontrer des formations qui risquent de s'effondrer.

Les polymères naturels constituent une solution plus pratique pour les forages d'eau, mais ils sont relativement chers et devraient donc être utilisés avec parcimonie. Un exemple de ces polymères, utilisé dans les champs pétroliers et pour les forages d'eau, est la gomme de guar, une poudre blanc cassé extraite des fèves de guar. C'est un bon émulsifiant, qui est utilisé dans l'industrie alimentaire. Elle est donc biodégradable et perdra sa viscosité naturellement après quelques jours. Les polymères se mélangent mieux en intégrant la poudre en neige dans un jet d'eau afin de prévenir la formation de grumeaux. La boue polymère devrait être mélangée durant la phase de montage – prévoir en général au moins 30 minutes – afin qu'elle ait le temps de « prendre » (devenir visqueuse).

En plus d'avoir les propriétés habituelles de la boue, les fluides de forage à base de polymères forment une couche sur les déblais argileux, empêchant la formation d'agrégats collants (« anneaux » d'argile) au-dessus du trépan, car si

cela se produit, il faut interrompre le forage pour les enlever (une solution simple pour prévenir l'agrégation d'argile consiste à ajouter du sel au fluide de forage). Un autre avantage des polymères est qu'ils permettent, lorsque le forage se fait dans l'argile, de distinguer les débris de forage de la boue. La dégradation des boues polymères est accélérée par les températures ambiantes élevées, l'acidité et la présence de bactéries (qui utilisent le polymère comme source de nourriture) : la boue polymère ne se conservera que deux à trois jours dans des conditions tropicales et peut causer une infection bactérienne dans le forage.

Le mélange normal pour la gomme de guar est d'un kilo par mètre cube d'eau ; pour les forages réalisés dans des formations argileuses, utiliser jusqu'à 0,5 kg par mètre cube et pour les formations qui risquent de s'affaisser, utiliser un à deux kg par mètre cube.

Il est possible que les poudres de polymère naturel aient une durée de vie limitée et il convient de le vérifier avant d'acheter un stock auprès d'un fournisseur. Des produits conservateurs alimentaires ont été utilisés comme additifs afin d'empêcher que des bactéries provoquent la dégradation des boues. Lors de l'utilisation de polymères, respecter les directives du fabricant. Des agents moussants sont aussi souvent ajoutés au fluide de forage, normalement en cas de forage rotary à l'air (voir section 5.1.2).

A) Contrôle de la viscosité de la boue de forage

Chaque additif ajouté à la boue (bentonite, boue, sel, etc.) doit être mélangé à l'eau en circulation afin d'arriver à la viscosité voulue. Cela peut se faire tout d'abord dans une fosse préparée à cet effet (voir figure 12), mais à mesure que le forage progresse, et en particulier si les eaux souterraines sont atteintes, la boue sera diluée, et il faudra ajouter plus de boue ou d'additif en poudre. Si la viscosité est trop faible, le fluide risque de s'infiltrer dans la formation et il pourrait ensuite être difficile d'éliminer les fines particules

Cependant, l'auteur a découvert qu'à une température quotidienne de 38 à 42°C ou plus au Soudan, la boue à base de gomme de guar (une marque particulière achetée à Nairobi) ne se conservait pas plus d'un jour : la décomposition et la perte de viscosité débutaient dès le lendemain.



Figure 11. Le viscosimètre « entonnoir de Marsh ». En haut: vue d'un filtre intégré à l'entonnoir. En bas: mesure graduée en plastique de 1000 ml qui porte également la marque du quart (946 ml)

de boue de la paroi d'un aquifère rencontré, ce qui réduirait le rendement du forage (voir section 6.2). Si une boue est trop « claire », elle risque en outre d'entraîner la chute de déblais sur le trépan, qui se trouvera bloqué dans le trou. La viscosité de la boue de forage peut être contrôlée facilement et régulièrement, à l'aide d'un simple viscosimètre appelé « entonnoir de Marsh ». Il s'agit d'un entonnoir en plastique cranté, muni d'un filtre ou d'une passoire intégrée, qui permet de filtrer les morceaux quand l'échantillon de boue y est versé (voir figure 11 ; pour des détails sur son acquisition, voir la référence de produit 4, annexe 7).

L'entonnoir de Marsh indique la viscosité en fonction du temps qu'il faut à un quart (946 millilitres) de boue de forage pour en ressortir. La technique consiste à verser un échantillon de boue fraîche dans l'entonnoir par le filtre jusqu'à la marque du quart, ou jusqu'au niveau du filtre intégré, tout en bloquant l'orifice de sortie avec un doigt. Laisser la boue s'écouler dans un conteneur gradué ou marqué et chronométrer le temps nécessaire pour obtenir un quart de boue. Rappelez-vous aussi de relever la température ambiante ou de la boue au moment de la mesure.

Temps typiques de passage à travers un entonnoir de Marsh dans des conditions de forage habituelles

Boue de forage normale :	35 à 45 secondes
Sable moyen :	45 à 55 secondes
Sable grossier, perméable :	55 à 65 secondes
Gravier :	65 à 75 secondes
Gravier grossier :	75 à 85 secondes
Zones très perméables :	60 à 80 secondes
Perte partielle dans les zones aquifères :	plus de 100 secondes

Une boue très visqueuse peut aussi être nécessaire lorsque le forage est réalisé dans du sable qui risque de s'affaisser.

Note : Un quart d'eau propre s'écoule en principe d'un entonnoir de Marsh en 25,5 secondes ; un litre en 27 secondes.

Dans les formations extrêmement poreuses ou fissurées, des pertes du fluide de forage (boue) peuvent se produire ; il arrive que tout le fluide de forage disparaisse dans une

cavité. Cela pourrait tout simplement mettre fin au forage si l'ajout de plus d'additifs ne permet pas d'augmenter la viscosité du fluide. Si la zone où le fluide se perd fait peu probablement partie d'un aquifère, une solution consiste à incorporer des matières fibreuses telles que sciure, herbe sèche ou excréments de bovins, tout en veillant à ce que la boue reste suffisamment fluide pour être pompée. Ces additifs peuvent bloquer de façon permanente de larges pores et cavités, et ils ne devraient donc pas être utilisés pour remédier aux pertes dans une zone aquifère.

Une autre option consiste à ajouter des agents moussants, essentiellement des savons ou des détergents et des tensioactifs biodégradables. Les produits ménagers tels que liquide vaisselle et poudre à lessive pour eau froide sont relativement efficaces s'il n'est pas possible de se procurer des additifs de forage professionnels. Le mélange de boue de forage et d'agent moussant peut produire une mixture dont la consistance ressemble à celle de la crème à raser. Ce mélange est très efficace pour boucher les cavités et faire sortir des matériaux hors d'un forage, en particulier si de l'air peut être introduit, même à l'aide d'un petit compresseur. Un mélange composé d'environ 5 % d'agent moussant et de 1 % de boue polymère produit une mousse relativement visqueuse.

Note : Une mousse épaisse prend plus de place et son utilisation peut nécessiter des fosses de décantation plus grandes que celles prévues initialement.

B) Fosses à boue

Des fosses à boue sont nécessaires pour mélanger la boue comme décrit précédemment. Elles peuvent être associées à un « bac d'aspiration » ou « puisard », où une pompe à boue puisera le fluide de forage. Ensuite, une fosse de « décantation » plus grande est essentielle. Elle servira à recueillir les déblais du forage transportés par la boue remontant à la surface de l'espace annulaire. Les deux fosses et le forage sont généralement reliés par des canaux étroits ou des rigoles et un déversoir. La figure 12 illustre schématiquement une installation typique. Les fosses à boue sont généralement creusées dans le sol à côté de la foreuse, mais certains entrepreneurs peuvent fournir des

citernes d'acier, ce qui revient au même. Si les fosses sont creusées dans une terre meuble, leurs parois peuvent être recouvertes de bâches de plastique, d'argile ou de ciment. La circulation de la boue dans les fosses doit être lente et régulière, afin de déposer les déblais et de faciliter la collecte d'échantillons de sol (généralement recueillis dans une rigole proche du forage). L'orifice d'aspiration et la crépine de la pompe à boue sont maintenus par une corde au-dessus du fond du bac d'aspiration, afin qu'une boue aussi propre que possible puisse être remise en circulation dans le forage par le biais des tiges de forage. Des bassins de décantation facultatifs peuvent être ajoutés entre le forage et la fosse de décantation principale afin de faciliter la sédimentation des débris. La capacité du bac d'aspiration devrait être plus ou moins égale au volume du trou en cours de forage, tandis que la capacité de la fosse de décantation devrait être au moins trois fois supérieure.

Pour calculer approximativement le volume des fosses, avec un diamètre de trou D en pouces (taille de l'outil) :

Volume du forage et volume du bac d'aspiration =
 $D^2H/2000$ en mètres cubes (ou $D^2H/2$ en litres),
H étant la profondeur du trou en mètres.

Le volume de la fosse de décantation devrait être
de $\sim 0,002D^2H$ mètres cubes (ou $2D^2H$ litres).

Si le diamètre du forage change, ajuster les calculs en conséquence.

Le bac d'aspiration devrait former un espace cubique aux côtés plus ou moins égaux. La fosse de décantation devrait être d'une longueur environ deux à trois fois supérieure à sa largeur et à sa profondeur (par ex. $2 \times 1,5 \times 1$ ou $3 \times 1 \times 1$ m).

Les divers niveaux de gris indiquent la sédimentation progressive des déblais du forage depuis l'espace annulaire du forage (cercle noir), puis à travers le système, du gris foncé (boue chargée de débris) au gris clair (boue propre).

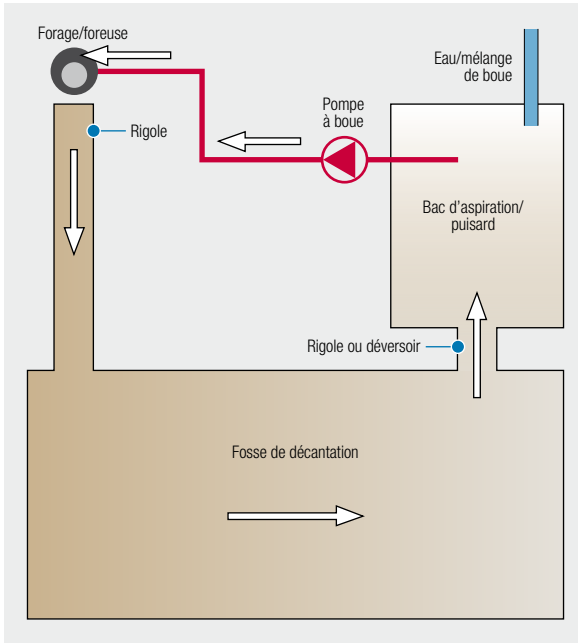


Figure 12. Plan schématique montrant des fosses à boue et le circuit de la boue (flèches blanches tournant dans le sens contraire des aiguilles d’une montre). Pas à l’échelle

La pompe à boue et les tuyaux d’injection de boue qui mènent jusqu’à la tige de forage apparaissent en rouge. La marque jaune indique l’endroit où les échantillons de déblais du forage devraient être recueillis. L’orifice d’entrée du mélange eau/boue est en bleu.

C) Vitesse de remontée du fluide

Pour le forage rotary à la boue, la vitesse de remontée du fluide devrait être de 15 à 30 mètres/minute.

Le tableau 3 présente le débit maximum et minimum du fluide en litres/minute pour divers diamètres de forage (trépan). Le débit maximal est approximativement deux fois supérieur au débit minimal.

Tableau 3. Rotary à la boue: débit du fluide de forage pour des trépan et tiges de forage de tailles diverses.

Diamètre du forage (trépan)		Diamètre de la tige de forage					
		58 mm (2¼")		75 mm (3")		88 mm (3½")	
		Débit du fluide litres/minute		Débit du fluide litres/minute		Débit du fluide litres/minute	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
75 mm	3"	30	60	—	—	—	—
90 mm	3½"	54	108	25	50	—	—
100 mm	4"	82	164	55	110	25	50
125 mm	5"	150	300	120	240	100	200
140 mm	5½"	180	380	160	320	135	270
150 mm	6"	230	460	200	400	175	350
200 mm	8"	450	900	415	830	390	780
250 mm	10"	700	1400	685	1370	650	1300

La capacité minimale d'une pompe de circulation peut être calculée à l'aide de la formule $Q = 7,5 (D^2 - d^2)$, où Q est le débit de remontée en litres/minute en fonction du diamètre de l'outil D et du diamètre de la tige de forage d (tous les deux exprimés en pouces).

Une fois un forage terminé, la boue consolidée, la mousse et les autres additifs (le cas échéant), ainsi que tous les débris doivent être évacués du forage. Il s'agit de la phase de développement, abordée à la section 6.2. Nous nous contenterons de dire ici que la dispersion des boues de forage requiert souvent d'autres additifs.

5.1.2 Forage rotary à l'air comprimé

L'utilisation d'air comprimé comme fluide de forage évite de devoir préparer et injecter des liquides dans un forage (bien que de l'eau et des additifs puissent être introduits à des fins spécifiques). Dans certains cas, l'utilisation du forage rotary à l'air peut être essentielle: par exemple, lors de la construction d'ouvrages d'observation en vue d'études sur la pollution, lorsque la contamination des eaux

souterraines devrait être limitée au minimum. Mais même ainsi, une formation peut être contaminée par des particules d'essence du compresseur. Les principales caractéristiques du forage rotary à l'air peuvent être résumées de la façon suivante :

Un fluide de forage de faible densité (l'air) doit circuler à une vitesse élevée pour faire remonter les débris à la surface. Par conséquent, pour les forages de grand diamètre, des compresseurs puissants sont nécessaires (voir tableau 4).

Les formations sèches présentent peu d'obstacles pour le forage rotary à l'air, mais au moment où on atteint une nappe d'eau en profondeur, il faut que la pression de l'air surpasse largement la pression hydrostatique pour qu'on puisse utiliser le MFT et faire remonter l'eau et les déblais à la surface. Les formations humides peuvent cependant poser des problèmes, tels que l'accumulation de déblais collants au-dessus du trépan (comme l'« anneau » d'argile mentionné ci-dessus).

L'air offre très peu de protection contre l'affaissement du forage, mis à part une poudre de roche sèche ou humide qui se dépose sur les parois. Comme les formations moins dures s'érodent facilement, il est essentiel de protéger la section supérieure plus fragile du forage en insérant un

Tableau 4. Forage rotary à l'air: taille maximale du trépan en fonction de la puissance du compresseur et du diamètre de la tige de forage

Puissance du compresseur			Diamètre maximal du forage (trépan)					
m ³ / min	litres/ sec	pd ³ / min	Diamètre de la tige de forage 58 mm (2¼")		Diamètre de la tige de forage 75 mm (3")		Diamètre de la tige de forage 88 mm (3½")	
3	50	100	85 mm	3"	—	—	—	—
5	80	175	100 mm	4"	115 mm	4½"	125 mm	5"
7	120	250	115 mm	4½"	125 mm	5"	140 mm	5½"
10	175	375	125 mm	5"	140 mm	5½"	150 mm	6"
13	210	450	140 mm	5½"	150 mm	6"	165 mm	6½"
17	280	600	150 mm	6"	165 mm	6½"	175 mm	7"

tube en acier de longueur adéquate appelé « tube guide », dont le diamètre est un peu plus large que celui du trépan utilisé pour entamer le forage (dès la surface). Le tube guide devrait saillir un peu au-dessus du niveau du sol – mais pas trop pour ne pas entraver le fonctionnement de la table de rotation de la foreuse –, en laissant un espace suffisant pour que les déblais puissent être soufflés à l'extérieur. Au début, les forages sont réalisés avec de plus gros trépan, puis le diamètre est réduit à mesure que la profondeur augmente, après l'installation d'un tubage d'acier provisoire (tubage de protection inséré dans le tube guide) pour protéger les zones de formation instable. En général, la réalisation d'un forage à l'aide du rotary à l'air peut comprendre trois variations de diamètre, comme le montre la figure 10.

Pendant le forage rotary à l'air, la vitesse de remontée de l'air devrait varier entre 900 et 1200 mètres cubes/minute.

La puissance du compresseur nécessaire peut être calculée à l'aide de la formule $Q = \frac{1}{2}(D^2 - d^2)$ en mètres cubes/minute (D et d étant à nouveau exprimés en pouces).

Le tubage provisoire peut être particulièrement difficile à insérer dans un horizon contenant des pierres ou des blocs rocheux (tels qu'alluvions fluviales grossières), mais malheureusement ce type de formation contient souvent de bons aquifères. Des MFT peuvent briser les roches dures (ou les fragmenter partiellement), mais il y a toujours un risque que le marteau dévie ou s'enraye, ou que des morceaux de roche tombent à l'arrière du trépan et le coincent dans le trou. Le meilleur moyen de résoudre ce problème est d'installer un système de tubage simultané, fourni par la plupart des fabricants de MFT. Cela permet de pousser ou de tirer un tubage en acier au fond d'un forage, directement à la suite du marteau, de façon à éviter que les parois s'affaissent. Le marteau a un trépan d'un diamètre large permettant de creuser le trou nécessaire pour introduire ce tubage. La taille du trépan peut être réduite mécaniquement afin de

le sortir du tubage. Ces systèmes requièrent des foreuses avec des mâts solides et une puissance suffisante pour pouvoir insérer un tubage lourd dans des conditions de forage difficiles.

En cas de forage rotary à l'air, il est possible d'ajouter des mousses par le biais des tiges de forage afin d'éliminer la poussière émergeant d'un trou sec. Ainsi, le forage reste propre et cela évite que de fines particules colmatent les petites fissures aquifères qui peuvent être rencontrées. De plus, les bulles de savon aident à faire sortir les débris du trou. Par contre, la mousse ne fournit pas de support hydrostatique pour les forages qui risquent de s'effondrer et complique la collecte d'échantillons en profondeur.

5.2 Relevé de log de forage

Pour qu'un forage soit correctement suivi, le foreur et le responsable doivent connaître sa profondeur exacte en tout temps. Ils en ont besoin pour calculer le prix des travaux et pour le dimensionnement du forage (voir section 6). Tout d'abord, relever la longueur du trépan et de tout autre outil qui pourrait être utilisé pour réaliser le forage. Placer l'outil sur le sol et faire une marque « 0 » à la craie sur la première tige de forage, par rapport à un point adéquat sur la foreuse, à une hauteur connue au-dessus du niveau du sol, comme la table de la foreuse (qui maintient les tiges de forage au centre du trou). À partir de là, il est possible de faire des marques sur la tige de forage à intervalles réguliers – par exemple à chaque demi-mètre – pour enregistrer la profondeur du forage et faciliter le contrôle de la vitesse de pénétration.

A) Échantillons de formation

Il faut recueillir des échantillons de formation à mesure que le forage progresse : l'intervalle habituel entre chaque échantillonnage est d'un mètre. Ce sont évidemment des échantillons très remaniés, qui ont été coupés ou cassés de leur formation d'origine, et ils ne devraient donc pas être

Les échantillons de formation, en cas de forage rotary à l'air, sont généralement recueillis en plaçant une pelle sous la table de rotation de la foreuse à côté du tube guide. Les échantillons sont soufflés à l'extérieur et les fragments de roche s'accumulent autour du tube guide, certains atterrissant sur la pelle. Après une période d'échantillonnage définie, la pelle est retirée avec les nouveaux échantillons. Il faut souvent rappeler aux foreurs de procéder à cette collecte d'échantillons.

Les foreurs oublient souvent de faire ces marques à la craie. Le responsable doit savoir combien de tiges de forage pénètrent dans le trou. La longueur totale de ces tiges, ajoutée à la longueur du trépan, donne la profondeur totale (faites attention aux tiges de forage dont la longueur est légèrement différente).

utilisés pour en déduire des caractéristiques telles que la stratification, la texture, la porosité ou la perméabilité de la formation. Il y aura un léger délai avant que les fragments de formation soient ramenés à la surface par la boue, mais une estimation approximative de la vitesse de remontée devrait permettre de déterminer à quelle profondeur les déblais ont été détachés. Gardez à l'esprit que si la viscosité de la boue est trop élevée ou que la formation s'effondre (viscosité trop faible), certains fragments risquent de redescendre dans le trou, et de causer une confusion. Les déblais recueillis dans le canal de boue près du forage (voir figure 12) devraient être nettoyés à l'eau afin de retirer la boue et disposés dans l'ordre (en fonction de la profondeur à laquelle ils ont été obtenus) sur le sol ou dans une boîte avec des compartiments séparés pour chaque échantillon. Le responsable ou le géologue du site peut ensuite les inscrire sur le log de forage et les placer dans un sac si nécessaire. Les échantillons devraient bien sûr être étiquetés correctement, avec toutes les informations nécessaires au travail en cours.

L'eau découverte durant le forage rotary à la boue se signale généralement (à moins que la quantité soit vraiment faible) par une dilution rapide du mélange de boue. En cas de forage rotary à l'air, la présence d'un aquifère est beaucoup plus évidente, car la machine commencera à souffler des fragments de roche humide au lieu de poussière sèche.

Les principaux attributs d'un log de forage sont la précision et la cohérence. Un bon ensemble de logs de forage peut constituer une ressource utile lors de la planification de futurs programmes de forage. Les foreurs doivent tenir leur propre log et prendre leurs propres notes et ce, avec précision, comme les contrats le prévoient souvent (voir section 11). Cependant, dans la pratique, on ne peut pas toujours s'y fier, surtout si le responsable s'absente du site pendant quelque temps. Les foreurs et le responsable devraient noter tous les échantillons géologiques et les découvertes d'eau, car ce sont des informations importantes qui seront nécessaires pour dimensionner le forage et prévoir l'équipement à installer.

Un log de forage complet peut aussi inclure des diagraphies géophysiques, qui ne sont généralement effectuées qu'une fois le puits terminé. Ces systèmes sont brièvement décrits à la section 6.3.3.

L'annexe 1 présente un exemple typique de log de forage qui peut être utilisé pour le forage rotary à la boue et à l'air, et que le responsable devrait conserver. La fiche du foreur devrait aussi comprendre des informations sur le temps consacré au forage ou à d'autres activités, le temps d'attente et la durée des immobilisations (pannes).

6. DIMENSIONNEMENT, DÉVELOPPEMENT ET FIN DU FORAGE

Après avoir réalisé un forage de la profondeur requise, le responsable devrait disposer des informations suivantes :

- la profondeur du forage ;
- un log lithologique du forage ;
- le(s) diamètre(s) du forage et la profondeur de toute réduction du diamètre ;
- la profondeur de toute découverte d'eau (le cas échéant) ;
- les différentes vitesses de pénétration ;
- le niveau statique approximatif de l'eau dans le forage (ou une indication du niveau possible).

Toutes ces données devraient apparaître sur le log du forage (voir annexe 1) et être utilisées durant la phase de dimensionnement. Le responsable devrait déjà avoir une idée du dimensionnement final au moment de choisir les diamètres. Par exemple, si le forage sera équipé d'une pompe à main, un diamètre large serait inutilement coûteux et une seule taille de trépan suffira – peut-être deux au maximum car les pompes à main sont difficiles à actionner lorsque l'eau est puisée à de grandes profondeurs.

6.1 Dimensionnement du forage

À mesure que l'eau est pompée hors d'un forage, le niveau de l'eau diminue d'une quantité appelée « rabattement », qui se stabilise finalement pour ce débit d'extraction. Si le niveau de l'eau ne se stabilise pas et continue de diminuer jusqu'à ce que le forage soit « épuisé », cela signifie que le trou est surexploité. Dans cet ouvrage, nous partons du principe que les forages sont conçus dans le but d'optimiser le débit et le rendement, exigence normale pour tous les forages, mis à part ceux équipés de pompes à main.

- Le débit maximal d'un forage est défini comme le rendement qu'un forage peut offrir indéfiniment avant que le rabattement dépasse la recharge provenant de l'aquifère.
- Le rendement du forage est techniquement défini comme le débit spécifique effectif (débit par unité de rabattement : par exemple, en litres par seconde et par mètre)

Une fois que les foreurs ont retiré tous les éléments du tubage provisoire et du tube guide installés durant le forage, il faudrait vérifier la profondeur du forage à l'aide d'un fil à plomb, afin de pouvoir définir avec précision le dimensionnement de la construction.

divisé par le débit spécifique théorique, qui peuvent tous les deux être calculés par un essai de pompage. Le débit spécifique décroît à mesure que le débit augmente.

6.1.1 Tubage du forage

Les forages sont construits en insérant des éléments de tubage de protection définitifs qui sont abaissés ou poussés dans le trou à l'aide de la foreuse jusqu'à la profondeur requise. Les éléments du tubage peuvent être assemblés par des pas de vis, des brides à collerette, de la colle, des rivets ou par soudure. Le tubage s'élève normalement jusqu'à la surface et dépasse quelque peu (env. 0,7 mètre) du sol. Les éléments de tubage existent en tôle, en acier inoxydable et en plastique (notamment PVC rigide, ABS, polypropylène et plastique renforcé de fibres de verre). Les tubages en plastique sont plus fragiles et se déforment plus facilement que ceux en acier (en particulier les pas de vis), et devraient donc être principalement utilisés pour les forages à faible débit et peu profonds. Le tubage devrait pouvoir supporter la charge hydraulique maximale à laquelle il peut être soumis, c'est-à-dire environ 10 kilopascals (kPa) pour chaque mètre au-dessous du niveau de l'eau jusqu'au rabattement maximal attendu. Le tableau 5 présente quelques valeurs typiques de la résistance à l'écrasement du tubage (Clark, 1988), mais étant donné le nombre de variables, il est préférable de consulter les indications des fabricants.

Le tubage en acier existe dans une vaste gamme de qualités et de poids. Un tubage de qualité moindre peut être

Tableau 5. Valeurs types de la résistance à l'écrasement du tubage

Matériel de tubage	Épaisseur de la paroi du tubage	Résistance à l'écrasement
PVC rigide	12,4 mm	660 kPa
Polypropylène	12,7 mm	690 kPa
Plastique renforcé de fibres de verre	6 mm	690 kPa
Tôle	9,4 mm	11,1 MPa

Étant donné leur fragilité, les tubes en plastique devraient être entreposés et transportés avec soin. Empilez le matériel correctement à l'ombre (pas à la lumière directe du soleil), car le plastique risque de se dégrader et de se déformer sous l'effet de la chaleur et de se dégrader en raison des rayons ultraviolets naturels. En cas de températures très froides (inférieures à zéro), le PVC devient cassant.

Un entrepreneur arrivera peut-être sur le site avec divers éléments disparates de tubage en acier, que les foreurs essayeront de souder ensemble. Dans ce cas, faites attention aux foreurs qui utilisent ou ont utilisé des meuleuses d'angle pour couper le tubage, car ces outils ont tendance à produire des extrémités légèrement courbes ou arrondies. L'auteur a vu des foreurs essayer de souder des tubages en acier dont les sections adjacentes présentaient un espace considérable et, en résultat, la soudure inférieure s'est brisée dans le trou. Vérifiez aussi que les foreurs utilisent le bon type de baguette de soudure : les joints tôle/tôle, tôle/acier inoxydable, ou acier inoxydable/acier inoxydable, requièrent différents types de baguette. Si la mauvaise baguette est utilisée, le tubage risque de se disloquer dans le forage.

employé pour les puits tubulaires peu profonds, mais de l'acier industriel de bonne qualité devrait être utilisé pour les forages plus profonds (en particulier ceux de plus de 200 mètres de profondeur) et quand les conditions du sol entravent l'insertion (gravier grossier/blocs rocheux). Il existe aussi des types particuliers de tubage qui résistent aux eaux corrosives, mais l'acier inoxydable est le meilleur moyen de lutter contre la corrosion. Les éléments de tubage existent généralement en longueurs standard, et sont déjà munis de pas de vis ou d'autres méthodes d'assemblage.

6.1.2 Crépines des forages

Lorsqu'un forage a été réalisé dans une zone aquifère, le tubage doit comprendre des ouvertures qui laissent l'eau pénétrer aussi efficacement que possible, tout en retenant le matériel de la formation. Ces sections perforées sont appelées crépines de forage ou de puits. Elles existent en tailles et en systèmes d'assemblage semblables au tubage, ce qui permet de les fixer au tubage plein adéquat selon n'importe quelle combinaison ou « colonne ». Il existe en outre des crépines avec des ouvertures (fentes) de forme et de taille diverses, des fentes simples droites aux perforations à nervures repoussées plus complexes et aux crépines à fil profilé en V enroulé en spirale. Les fentes des crépines devraient être de taille, d'ouverture et de formes régulières car il se peut qu'elles doivent retenir efficacement toutes les particules d'une certaine taille. Un tubage plein en

plastique peut facilement être découpé à l'aide d'une scie ou d'une mortaiseuse spéciale, mais faites attention aux entrepreneurs qui découpent des fentes irrégulières et désordonnées dans du tubage en acier à l'aide de meuleuses ou de chalumeaux oxyacétyléniques. Le coefficient d'ouverture des crépines en plastique fabriquées en usine est souvent supérieur à 10% de la surface totale, mais les trous grossiers découpés dans le tubage en tôle couvrent rarement plus de 2% ou 3% de la surface. Les fentes des crépines devraient être légèrement plus petites que la taille moyenne des grains de la structure de l'aquifère et devraient laisser l'eau pénétrer dans le forage à une vitesse allant de 1 à 6 cm/seconde (0,01 à 0,06 m/seconde). La vitesse d'entrée est définie comme le débit du forage divisé par la surface d'ouverture efficace de la crépine. Une vitesse d'entrée trop élevée pourrait entraîner l'incrustation de la crépine, des pertes excessives et d'autres conséquences dommageables dues à un écoulement turbulent.

A) Formule de calcul de la surface d'ouverture d'une crépine :

**Surface d'ouverture par mètre de crépine
en $\text{cm}^2 = l \times w \times n/10$, l étant la longueur de la fente
en cm, w étant la largeur de la fente en mm
et n étant le nombre de fentes par mètre.**

Par exemple, une surface d'ouverture minimale de 100 cm^2 assure approximativement la vitesse d'entrée minimale pour un débit de ~0,3 litre/seconde (~4 gallons/minute). Dans la pratique, d'autres éléments de crépine devraient être ajoutés en prévision des variations dans l'aquifère (qui ne sera probablement pas homogène) et dans le forage (voir tableau 1).

Les crépines les plus efficaces sont les célèbres « crépines Johnson » – fentes de type continu avec du fil profilé en V enroulé en spirale autour d'une cage de tiges de soutien longitudinales. Toute la structure peut être composée

d'acier inoxydable ou d'acier doux galvanisé. Ces enroutages de fil de fer sont faits de telle façon que les fentes s'élargissent vers l'intérieur, ce qui réduit considérablement le degré de colmatage des crépines, comme l'illustre la figure 14. La surface d'ouverture efficace des crépines Johnson est plus de deux fois supérieure aux fentes conventionnelles, ce qui permet de laisser entrer davantage d'eau par élément. Il en existe différents modèles, qui ont des fentes de 0,15 à 3 mm ou un diamètre de 1 ½" à 32", tandis que les éléments mesurent 3 ou 6 mètres. La profondeur du forage détermine la qualité de la crépine utilisée. Les extrémités sont simples (pour la soudure) ou filetées (référence de produit 5, annexe 7). Les crépines Johnson permettent d'obtenir un débit d'environ 5 à 6 litres/seconde par mètre, ce qui signifie qu'un élément de 6 mètres peut donner ~30 à 35 litres/seconde et un élément de 12 mètres deux fois plus.

Pour la plupart des projets, et en particulier les forages peu profonds ou à faible débit, des tubes et des crépines PVC de base suffisent. Le tableau 6 présente l'ouverture minimum

Tableau 6. Ouverture minimum des crépines en fonction du débit de pompage

Débit de pompage attendu (litres/seconde)	Diamètre du forage (en pouces)	Ouverture minimum des crépines (cm ²)
0,3	6	100
0,5	6	180
0,8	6	300
1,0	6	400
1,5	6	500
2,0	6	750
2,8	6	1000
4,2	6	1500
5,6	8	2000
7,0	8	2500
8,3	8	3000
11,0	10	4000

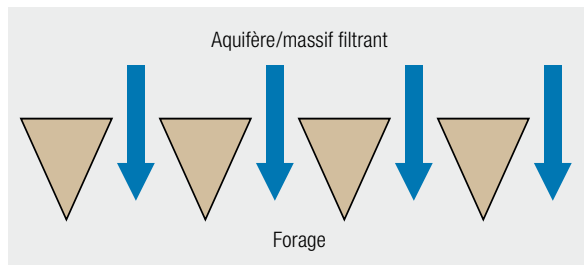


Figure 13. Écoulement de l'eau à travers une crépine avec fil de fer profilé en V

des crépines en fonction du débit de pompage et du diamètre du forage. L'annexe 2 contient des exemples de prix récents pour des tubes et des crépines de tailles diverses.

6.1.3 Massif filtrant

Après l'insertion de la colonne de tubes et de crépines, des matériaux naturels auront tendance à tomber des parois du forage dans l'espace annulaire, formant un remblai naturel ou « massif filtrant » qui aide à filtrer l'eau. La taille des fentes de la crépine devrait être telle qu'elle ne laisse passer dans le forage que les particules les plus fines de ce remblai. Celles-ci peuvent être évacuées durant le développement, ne laissant comme filtre que la partie la plus grossière. Un aquifère est adapté à la formation d'un massif filtrant naturel si le grain est grossier et mal gradué, comme c'est souvent le cas du gravier alluvial (une situation relativement rare). Pour un forage réalisé dans une formation instable ou dans une formation bien graduée, et avec une forte proportion de fines particules (ce qui apparaîtrait dans les échantillons), il faudra un massif filtrant artificiel autour des crépines. Quand les fentes des seules crépines disponibles sur place sont plus larges que la taille moyenne des grains de l'aquifère, il convient d'installer un massif filtrant. Malheureusement, en raison de contraintes de temps ou d'autres restrictions, il est rarement possible d'analyser en détail la taille des grains de l'aquifère sur le terrain. Il faut donc ici un certain degré d'intuition. En cas de doute, installer un massif filtrant artificiel.

A) *Massif filtrant artificiel*

Dans l'idéal, un massif filtrant artificiel devrait être composé de gravillons de quartz propres, arrondis fournis en sacs. En général, des grains de la taille de petits pois sont adéquats. Le sable de rivière grossier bien arrondi est souvent idéal. Les grains devraient être un petit peu plus gros, mais pas plus de deux fois plus gros que les fentes des crépines. Lisses et sphériques, les grains devraient descendre facilement dans l'espace annulaire, sans s'agglutiner et en laissant des bulles d'air (un peu d'eau facilite souvent le processus).

La pratique habituelle consiste à former un espace annulaire de 3 à 4 pouces (7,5 à 10 cm) de largeur pour le massif filtrant (par ex. un filtre de 15 cm dans un trou de 30 cm). La colonne de tubes/crépines doit être au milieu du trou. La plupart des forages ne sont pas parfaitement droits, et le tubage sera donc presque inévitablement en contact avec la paroi en certains endroits, à moins d'être bien centré. Pour y parvenir, il faut utiliser des centreurs manufacturés (des « collerettes » souples) ou d'autres options acceptables. Malheureusement, dans les pays en développement, peu d'entrepreneurs se donnent la peine de fournir des centreurs, même s'ils en ont entendu parler. Il est extrêmement difficile, voire impossible, de fabriquer des centreurs de tubage efficaces dans des endroits reculés. La section 11 de cet ouvrage suggère que les organisateurs ou les responsables du projet tentent de se familiariser avec la compétence des entreprises qui répondent à l'appel d'offres pour s'assurer que celle qui obtiendra le contrat connaisse les composantes techniques essentielles et soit disposée à les fournir.

De nombreux entrepreneurs apporteront sur le site ce qu'ils estiment être du gravier adéquat, qui peut être composé de pierre concassée irrégulière ou de granulats de construction. Il revient alors au responsable de décider si ce gravier est acceptable, en fonction de facteurs tels que l'isolement du lieu et la disponibilité de meilleurs matériaux. Si les seuls matériaux disponibles sont des granulats de type « béton » et que l'espace annulaire du trou est étroit (moins de trois pouces [7,62 cm]), envisager, si la situation s'y prête, d'utiliser des crépines à fentes plus étroites, sans massif filtrant.

Avant de verser le massif filtrant dans l'espace annulaire, ce qui doit être fait en douceur et sans précipitation, calculer le volume de l'espace annulaire (il est rassurant de voir que le volume correct de gravier a été installé). Là encore, il faut un relevé précis des changements de diamètre du forage. Lorsqu'un massif filtrant est versé dans un forage où le niveau de l'eau est élevé, cela provoque généralement un déplacement de l'eau, qui monte et déborde. Ce

débordement s'arrêtera brusquement quand la crépine sera recouverte de gravier. Continuez de verser du gravier jusqu'à ce que vous soyez certains que le haut du massif est largement plus haut que l'extrémité supérieure de la crépine.

Volume de l'espace annulaire entre le diamètre de forage D et le diamètre de la colonne de tubage/ crépine d (D et d étant tous les deux exprimés en pouces), longueur L (en mètres) = $\sim \frac{1}{2}L(D^2-d^2)$ en litres.

Des massifs filtrants peu épais (moins de 50 mm ou 2" d'épaisseur) peuvent être installés pour stabiliser la formation, mais uniquement en présence d'un aquifère consolidé fracturé ou légèrement altéré. Il convient en outre de relever que les massifs filtrants de plus de 150 mm (6") d'épaisseur compliqueront le développement du forage, en particulier s'il faut enlever la couche de boue de forage qui s'est formée.

L'introduction d'un massif filtrant naturel ou artificiel dans un forage réduira la surface d'ouverture efficace de la crépine, car la zone ouverte (poreuse) du système à l'endroit où l'aquifère et la crépine entrent en contact sera limitée par le massif qui se trouve dans l'espace annulaire. Des grains bien arrondis de taille uniforme (comme ceux du massif filtrant « idéal ») ont l'une des porosités (environ 40%) et perméabilités (20 mètres/jour ou plus) primaires les plus élevées dans les sédiments non consolidés. Dans la pratique, ces chiffres sont sans doute moins élevés. Le coefficient d'ouverture efficace de l'aquifère adjacent sera plus probablement d'environ 10%. Il faudrait donc partir du principe que le coefficient d'ouverture efficace d'une crépine, même avec un massif filtrant de bonne qualité, représente environ la moitié du coefficient d'ouverture *réel* de la crépine. Le coefficient d'ouverture efficace minimal recommandé de toute crépine installée est d'environ 10%.

Le principal aspect du dimensionnement des forages consiste à décider de la combinaison de tubage plein et de

crépines à insérer, du type de crépine à utiliser, et de la nécessité d'utiliser un massif filtrant (ou un stabilisateur de formation peu épais). Le tableau 7 présente une synthèse de ces décisions pour différents types de sol susceptibles d'être rencontrés durant le forage. Un « trou ouvert » est un ouvrage où ni crépines, ni massif filtrant ne sont utilisés dans la zone de l'aquifère, mais tous les forages que l'auteur a vus nécessitaient un tubage, au moins pour stabiliser la couche superficielle du sol ou la zone altérée (régolite). Les trous ouverts sont principalement adaptés aux pompes à main, car une motopompe puissante risquerait d'aspirer des débris, même dans une formation rocheuse dure et stable. Si une formation stable rencontrée après avoir découvert de l'eau fait diminuer la vitesse de pénétration, il est possible de créer un peu plus rapidement une profondeur supplémentaire qui servira de puisard sans tubage en réduisant la taille du trépan.

6.1.4 Choix de la pompe

Il faut également considérer le type de pompe à utiliser dans le forage, ainsi que sa taille, et le diamètre du tubage et des crépines nécessaire pour l'accueillir. Les forages à débit relativement faible prévus pour des pompes à main avec pistons immergés font rarement plus de 30 mètres de profondeur et n'ont pas besoin d'un diamètre large (10 cm peuvent suffire). Certaines pompes à main peuvent être équipées d'un contrepoids, afin de réduire l'effort nécessaire pour pomper l'eau à des niveaux plus profonds (principalement pour les femmes dans les pays en développement). La réduction mécanique de la course du piston immergé peut faciliter le pompage de l'eau, mais comme la quantité d'eau obtenue à chaque coup de pompe est réduite, il faut plus de temps pour remplir un conteneur. Les forages peu profonds puisent souvent dans des aquifères qui se trouvent dans des zones altérées, sur de l'argile ou un socle (par ex. de granite) dur et imperméable. Le schéma à l'annexe 3A montre comment un exemple typique peut être équipé d'une pompe à main. La pratique habituelle consiste à placer l'orifice d'aspiration de la

Tableau 7. Choix des crépines et des massifs filtrants pour diverses conditions

Caractéristiques de l'aquifère Physiques/ Chimiques	Cristallin (fissures ou joints étroits)	Consolidé (petits interstices / porosité)	Non consolidé	Stable mais avec des fissures / cavités
Peu épais (<100m)	Ni crépine, ni massif filtrant normalement requis (trou ouvert). Il faudra peut-être installer une crépine et stabiliser la formation si celle-ci est fracturée.	Ni crépine, ni massif filtrant normalement requis (trou ouvert). Il faudra peut-être installer une crépine et stabiliser la formation si celle-ci est fracturée.	Crépine avec coefficient d'ouverture élevé et massif filtrant requis. Un massif filtrant naturel peut se former si l'aquifère est homogène.	Crépine avec coefficient d'ouverture élevé. Massif filtrant requis si les cavités renferment des sédiments meubles.
Épais (>100m)	Longue crépine avec coefficient d'ouverture faible (10%). Pas de massif filtrant (mais stabiliser éventuellement la formation si celle-ci est fracturée).	Longue crépine avec coefficient d'ouverture faible (10%). Pas de massif filtrant (mais stabiliser éventuellement la formation si celle-ci est fracturée).	Longue crépine (ou plusieurs crépines) et massif filtrant requis. Un massif filtrant naturel peut se former si l'aquifère est homogène.	Longue crépine (ou plusieurs crépines) et massif filtrant requis si les cavités renferment des sédiments meubles.
Profond (>200m)	Ni crépine, ni massif filtrant requis (mais stabiliser éventuellement la formation si celle-ci est fracturée).	Ni crépine, ni massif filtrant requis (mais stabiliser éventuellement la formation si celle-ci est fracturée).	Tubes/crépines solides (acier) et massif filtrant requis. En profondeur, un massif filtrant naturel a moins de probabilités de se former.	Tubes/crépines solides (acier) et massif filtrant requis si les cavités renferment des sédiments meubles.
Eau corrosive (p. ex. forte salinité, pH bas, température élevée)	Comme ci-dessus, mais utiliser des tubes/crépines en plastique ou en acier inoxydable.	Comme ci-dessus, mais utiliser des tubes/crépines en plastique ou en acier inoxydable.	Comme ci-dessus, mais utiliser des tubes/crépines en plastique ou en acier inoxydable.	Comme ci-dessus, mais utiliser des tubes/crépines en plastique ou en acier inoxydable.
Eau incrustante (p. ex. riche en fer/carbonate)	Comme ci-dessus, mais utiliser une ou des crépine(s) à coefficient d'ouverture élevé afin de réduire la vitesse d'entrée.	Comme ci-dessus, mais utiliser une ou des crépine(s) à coefficient d'ouverture élevé afin de réduire la vitesse d'entrée.	Comme ci-dessus, mais utiliser une ou des crépine(s) à coefficient d'ouverture élevé afin de réduire la vitesse d'entrée.	Comme ci-dessus, mais utiliser une ou des crépine(s) à coefficient d'ouverture élevé afin de réduire la vitesse d'entrée.

pompe légèrement au-dessus de l'extrémité supérieure de la crépine. Pour les pompes à main, cela n'a pas une grande importance : dans l'exemple figurant à l'annexe 3A, l'orifice d'aspiration de la pompe pourrait être abaissé dans la partie supérieure du trou ouvert/puisard (en ajoutant des tuyaux) en cas de baisse importante du niveau statique de l'eau dans le forage due à une sécheresse prolongée.

Les modèles de pompe plus puissants, comme les pompes électriques immergées et les pompes volumétriques rotatives, doivent toujours être installés dans un tubage protecteur plein : dans ce cas, les crépines ne sont pas appropriées. Le diamètre interne de la chambre d'aspiration devrait mesurer au moins 5 centimètres (~2 pouces) de plus que le diamètre externe de la pompe.

Avant l'installation, une colonne de tubes/ crépines en tôle peut être scellée à la base au moyen de la méthode suivante (voir figure 14 ci-contre) : à l'extrémité inférieure prévue de la colonne, dessiner d'abord un motif régulier et long « en dents de scie » autour de la circonférence (en général huit « dents », de 0,5 à 1 mètre de long) ; découper des sections triangulaires dont le sommet pointe vers le haut (par rapport au forage) ; frapper les dents de scie sur le tubage de façon à former une pointe ; et souder les bords des dents ensemble afin de sceller le tubage.

6.1.5 Étanchéité du forage

La structure du forage doit être obturée en haut du tubage par un « avant-puits » (section 6.3.1). Elle peut aussi être scellée au fond afin d'éliminer tout risque que des matériaux pénètrent par d'autres voies que les crépines. Si le tubage est en plastique, cela peut se faire en fixant un « bouchon » au fond.

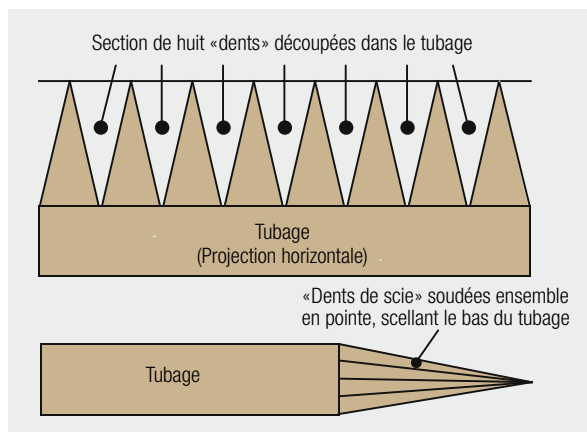


Figure 14. Fermeture du fond d'un tubage en tôle au moyen de la soudure en « dents de scie ». Longueur typique des dents : 0,5 à 1 m

On verra facilement qu'en produisant une pointe en bas, on facilitera l'introduction du tubage dans le forage, en particulier en cas de conditions de forage difficiles telles que gravier grossier, pierres ou blocs rocheux. De plus, ce procédé empêche le massif filtrant de l'espace annulaire de pénétrer dans le forage.

6.1.6 Exemples de forages

A) *Aquifère homogène*

Dans la figure 1, le forage du site hypothétique B a été réalisé dans un aquifère gréseux partiellement consolidé et relativement homogène qui requerrait un massif filtrant artificiel complet. Pour fournir un rabattement dynamique supplémentaire, l'orifice d'aspiration de la pompe a été placé à la hauteur d'une brève section de tubage plein, entre deux éléments de crépines. Les orifices d'aspiration de pompes de forte puissance devraient toujours être placés au-dessus de l'extrémité supérieure d'une crépine, ou dans une section de tubage plein entre des crépines (chambre d'aspiration, annexe 3B). L'écoulement rapide de l'eau dans une pompe ne devrait jamais passer directement à travers la crépine, car une entrée à vitesse élevée causera l'érosion et l'incrustation rapides de la crépine. De plus, l'eau s'écoulant *vers le haut* à travers une pompe immergée a un effet refroidissant plus efficace sur les parties en mouvement. En outre, il y aura moins de risques que la pompe aspire des particules qui risqueraient d'endommager le système.

B) *Exploitation de deux aquifères*

L'annexe 3C montre le type de forage suggéré pour le site hypothétique C de la figure 1. Il s'agit d'un forage qui traverse et exploite deux aquifères. Nous pouvons partir du principe que, sur la base des informations géologiques, ce site a été choisi pour un forage ayant un fort débit potentiel et relativement profond. Il est possible que les entrepreneurs aient eu pour instructions de fournir un tubage en tôle et des crépines Johnson pour les finitions. La présence d'une cavité importante contenant des

L'auteur a observé le même problème à plusieurs reprises : des entrepreneurs ne peuvent pas fournir de bouchon pour le tubage en plastique, mais estiment à tort que le tubage est solidement établi au fond du trou. En résultat, il faut souffler le massif filtrant perdu hors du trou et presser le tubage plus fort vers le bas (au risque de le casser) avant de pouvoir déverser un nouveau massif filtrant dans le forage. Sur un site dans le nord de l'Ouganda, on a dû le faire deux fois.

sédiments meubles (gravillons latéritiques) dans l'aquifère de calcaire fissuré plus profond aurait confirmé la nécessité d'installer un tubage et des crépines dans cette section, et pourrait même avoir mis fin au forage. Des échantillons du contenu des cavités auront été recueillis à la fin du forage, et les fentes de la crépine choisie seront suffisamment étroites pour retenir la plupart des matériaux. Si, comme dans cet exemple, une réduction du diamètre du tubage est jugée appropriée, des bagues de réduction peuvent être fabriquées sur place en coupant et en soudant des tubes en tôle (comme pour les pointes, figure 14). Ce dimensionnement permettra d'installer une pompe immergée à haut débit juste en dessus de la réduction de diamètre. Le rabattement ou niveau de pompage doit aussi être pris en considération. Il faudra peut-être installer une section de crépines au-dessus de la pompe, mais le niveau de l'eau durant le pompage ne doit pas descendre en dessous de l'extrémité supérieure de la crépine supérieure, car il faut éviter toute aération de la section supérieure de la crépine et de l'aquifère adjacent, afin de réduire le risque que la crépine s'incruste à cause du fer présent dans l'eau. Un bon dimensionnement devrait comprendre une longueur adéquate de tubage plein, jusqu'au bord supérieur de la première crépine. C'est là une autre mise à l'épreuve du bon sens et de l'expérience du concepteur ou responsable.

C) Forage dans une zone fracturée

Le site hypothétique D de la figure 1 illustre un exemple de construction de forage dans des roches fracturées, et le dimensionnement proposé figure à l'annexe 3D. Réalisé dans un granite fracturé mais stable, ce forage pourrait être aménagé comme un trou ouvert. Cela ne sera sans doute pas un forage solide, mais comme les zones fracturées peuvent être imprévisibles en termes de production d'eau (souvent, plus les fractures rencontrées sont nombreuses, meilleur est le débit), il peut valoir la peine d'installer une colonne de tubes/crépines en PVC au cas où une motopompe pourrait être installée. Ici, des crépines

à fentes relativement étroites, sans massif filtrant, suffisent probablement. Avec un peu de chance, le prolongement du tubage plein dans la zone aquifère fournit un rabattement suffisant (le choix de la pompe sera déterminé par les résultats de l'essai de pompage).

On peut se poser la question suivante : comment le concepteur d'un forage peut-il deviner quel type de pompe devra être installé avant qu'un forage particulier ait été soumis aux essais requis ? Durant la réalisation du forage, la quantité d'eau que l'air souffle à l'extérieur ou qui dilue la boue de forage indique au responsable si ce sera un « bon » forage. L'expérience facilite grandement ce processus. Lors du dimensionnement des forages, il faut souvent suivre son intuition.

On obtiendra plus d'informations sur le débit d'un nouveau forage durant la phase de développement.

6.2 Développement du forage

À ce stade, il peut sembler presque impossible que de l'eau propre et potable sorte d'un nouveau forage, mais, pour autant que celui-ci ait été correctement construit, ce sera effectivement le cas. Si un forage a été réalisé à l'aide de boue ou d'air, il faudra le nettoyer. Après l'installation du tubage définitif, des crépines et du massif filtrant (le cas échéant), le trou contiendra de l'eau sale, de la boue, de la roche broyée, de l'huile (des machines de forage) et peut-être d'autre débris. Le développement peut aussi réparer les dommages que le processus de forage a causés à l'aquifère adjacent, développer l'aquifère (accroître la transmissivité) et améliorer le rendement du forage.

Comme l'explique Driscoll dans son ouvrage *Groundwater and wells*, « le développement a deux objectifs principaux : 1) réparer les dommages causés à la formation durant l'opération de forage afin que ses caractéristiques hydrodynamiques naturelles soient restaurées et 2) modifier les caractéristiques physiques essentielles de l'aquifère près du forage afin que l'eau s'écoule plus librement vers un puits »¹.

1 F. G. Driscoll, référence n° 5, annexe 7 (traduction CICR).

Les outils de forage étalent de la roche broyée et de l'argile sur les parois du forage et le processus fait pénétrer de l'eau sale et de l'argile dans la matrice de la roche, obturant de nombreux points d'entrée de l'eau de l'aquifère. Si ces problèmes ne sont pas résolus, le rendement du forage sera très mauvais; il convient en outre de relever que l'eau sale qui serait pompée hors du forage – si les choses étaient laissées en l'état – endommagerait rapidement la pompe. Le forage rotary à la boue laisse sur les parois du forage un dépôt d'argile dure (*mud cake*), dont l'épaisseur peut souvent atteindre un centimètre et qui peut effectivement boucher les aquifères. Il n'est pas facile d'éliminer cette couche. Ce processus requiert des méthodes « violentes » ou « agressives » et ne devrait pas être précipité ou abandonné prématurément. De plus, comme les parois couvertes de dépôts de boue seront partiellement isolées de l'espace interne du forage par le tubage, les crépines et éventuellement un massif filtrant, le nettoyage sera d'autant plus difficile.

Le développement favorise aussi le positionnement correct du massif filtrant en éliminant les interstices. Il peut donc être nécessaire d'ajouter un peu de gravier au massif par la suite. Ce processus devrait se poursuivre jusqu'à ce que l'eau qui sort du forage soit, de l'avis du responsable, aussi propre que possible. De petites particules de sable peuvent occasionnellement sortir du forage, mais l'aspect trouble (turbidité) de l'eau devrait avoir disparu avant la fin du développement. Une production de sable excessive peut être causée par des interstices dans le massif filtrant ou par des tubes ou crépines endommagés. La turbidité est généralement causée par de l'argile colloïdale ou des micro-organismes, ces derniers pouvant donner à l'eau un goût et une odeur désagréables et favoriser les croissances organiques, notamment la vase.

6.2.1 Méthodes de développement

Dans la plupart des cas, le développement comprend l'injection d'air comprimé. Ce processus peut être facilité par l'utilisation d'additifs (dispersants) qui peuvent faciliter la dissolution de la boue de forage.

A) Dispersants

Les boues bentonitiques sont particulièrement difficiles à éliminer ; les polymères organiques sont biodégradables et, en théorie, sont détruits par les bactéries qui peuvent pulluler dans les puits. Les produits à forte teneur en chlore constituent de bons dispersants et servent en outre de désinfectants bactériens. L'hypochlorite de calcium (HTH, pour *high-test hypochlorite*) peut être utilisé comme dispersant ; pour une dissolution rapide de la gomme de guar, utiliser une solution d'hypochlorite (12 % de chlore) dans un mélange d'eau à 0,4 %. Pour une dispersion lente, une solution légère de peroxyde d'hydrogène peut être utilisée.

Un bon moyen de disperser la bentonite est d'utiliser des produits contenant du polyphosphate, comme le Calgon (marque d'adoucissant d'eau). Ce produit chimique contient de l'hexamétophosphate de sodium en grain ou en poudre, une substance hygroscopique (qui attire l'eau) qui détruit la cohésion et la plasticité des particules d'argile. Le Calgon en grains devrait être dissous dans de l'eau chaude ou bouillante (~un kilo de produit pour 40 à 50 litres d'eau chaude) : le dosage habituel est de 10 à 50 kilos de Calgon par mètre cube d'eau présent dans le forage (selon les estimations). Essayez de laisser le dispersant dans le trou pendant une nuit afin que la solution ait le temps de pénétrer dans les formations aquifères. Des concentrations plus élevées sont nécessaires pour éliminer les dépôts de boue plus résistants. Il est plus facile d'éliminer la boue restante une fois le forage nettoyé.

B) Traitement à l'acide

Le développement des forages réalisés dans des formations calcaires (calcaire, craie ou dolomie) peut être facilité par l'utilisation de certains acides (tels que l'acide hydrochlorique) qui dissolvent les pâtes calcaires sur les parois du forage. Le traitement à l'acide peut élargir et nettoyer les fissures d'un aquifère calcaire même lorsqu'elles se trouvent à des dizaines de mètres du forage.

Avant d'opter pour l'acidification, essayez de vous assurer des points suivants : 1) l'entrepreneur possède l'équipement et l'expérience nécessaires ; 2) les acides sont disponibles sur place et l'acide utilisé peut être éliminé sans danger (les entrepreneurs devraient respecter les règlements relatifs à l'élimination des déchets dangereux/ la pollution).

L'acidification des forages durant la réhabilitation est abordée à la section 10.2.2.

C) Pistonnage

La technique du pistonnage consiste à faire circuler l'eau de haut en bas d'un forage et, surtout, à travers les crépines, le massif filtrant, et la matrice de l'aquifère adjacent. De nombreux manuels sur ce sujet affirment que le pistonnage peut être fait mécaniquement, à l'aide d'un piston de refoulement ou d'un « *bailer* » (cuillère), mais l'auteur n'a jamais été témoin de cette technique. Le pistonnage peut aussi être effectué à l'aide de pompes, mais ce n'est pas recommandé car des débris risquent de pénétrer dans la pompe et de l'endommager. De plus, si la crépine est obstruée par un dépôt de boue, une pompe puissante pourrait dénoyer un forage, et la crépine risquerait de tomber à l'intérieur du puits sous l'effet de la pression hydraulique dans l'espace annulaire. Dans la pratique, le pistonnage est presque toujours effectué au moyen d'air comprimé – c'est-à-dire par la méthode du pompage par *air lift* à l'aide de tiges de forage fixées à la foreuse (après avoir retiré le trépan) et d'un compresseur.

D) Débit de purge

Entre les séances de pistonnage, de l'air est insufflé dans le forage et sa pression est ajustée afin que le débit d'eau sortant soit plus ou moins égal au débit entrant : c'est ce qu'on appelle débit de purge (*blowing yield*). La mesure de ce débit donne une indication du rendement du forage et aide à mettre au point un essai de pompage (voir section 6.3.2A). Le débit de purge peut facilement être mesuré si les foreurs font en sorte que toute l'eau (dans la pratique, la majeure partie de l'eau) éjectée du tubage puisse être canalisée dans une rigole ou une conduite souterraine jusqu'à un appareil de mesure, par exemple un seau dans une fosse ou un déversoir triangulaire. De l'avis de l'auteur, une méthode beaucoup plus simple et plus fiable, où le risque d'erreur est plus faible, consiste à chronométrer le temps nécessaire pour remplir un seau d'un volume connu



Figure 15. Mesure du débit de purge d'un nouveau forage

afin de connaître le débit. Un déversoir triangulaire est une ouverture de la forme d'un triangle inversé sur le côté d'une citerne ou d'un réservoir, utilisée pour déterminer le débit des eaux de surface. L'eau dont le débit doit être estimé peut passer par le déversoir et le débit peut être calculé en mesurant la profondeur de l'eau au sommet du déversoir. Divers ouvrages et sites Internet fournissent des tableaux définissant le débit pour des déversoirs de différents angles (le plus courant est de 90°).

E) Pompage par air lift

La méthode de base du pompage par *air lift* convient bien au développement car elle ne requiert pas de pièces mécaniques qui risqueraient d'être endommagées par les débris. La conduite d'amenée d'air peut être placée à l'intérieur d'une conduite de refoulement qui comporte un orifice d'évacuation à son sommet. L'extrémité de la conduite d'air est à une profondeur telle qu'elle est au moins à moitié immergée dans l'eau du forage (figure 16). Le pompage peut être interrompu et repris à intervalles en fermant la sortie d'air sur le compresseur, ce qui provoque le pistonnage. Des détentes brusques aspirent l'eau à travers la crépine (et le massif filtrant), puis, lorsque la vanne est fermée, la pression augmente et pousse à nouveau l'eau à travers la crépine. Ce cycle de pompage/non pompage

(va-et-vient) produit l'effet d'un piston de refoulement, et les matériaux sont effectivement ramollis et détachés des parois du forage/de l'aquifère. Normalement, les tiges de forage sont abaissées jusqu'au fond du trou et le pistonnage commence là, l'eau sale étant soufflée vigoureusement hors du tubage à la surface. Les tiges devraient être élevées et abaissées à intervalles réguliers afin que différentes parties de la crépine soient soumises à l'action de pistonnage.

F) Nettoyage au jet

Après avoir réalisé un forage, éventuellement à faible débit, à l'aide du rotary à la boue, ou en l'absence de compresseur, une autre solution est le nettoyage au jet, c'est-à-dire le nettoyage des parois du puits à l'aide de jets d'eau sous pression. La pompe à boue ou une autre pompe est utilisée pour puiser de l'eau propre dans une source telle que rivière, lac, réservoir souple ou citerne mobile, et l'injecter dans le forage en passant par les tiges de forage. À l'extrémité inférieure du train de tiges se trouve une buse, qui produit les jets à haute pression dirigés horizontalement vers les fentes des crépines ou la paroi du forage. Dans l'idéal, il sera possible de déplacer cette buse de bas en haut et de la faire tourner dans le forage. Cette méthode peut être utilisée avec une machine de forage par battage, mais il faudra un autre outil, qui sera glissé soit dans le train de tiges, soit dans un tuyau d'injection distinct introduit dans le trou. Le nettoyage au jet est efficace pour les crépines et les sections sans tubage, mais il fonctionne moins bien que le pistonnage quand il s'agit de pénétrer la matrice de l'aquifère. Évidemment, il ne permet pas d'obtenir un débit de purge, car l'eau est *injectée* dans le forage.

G) Nettoyage mécanique

Les méthodes mécaniques de nettoyage des forages, telles que les brosses et les grattoirs, sont rarement utilisées car elles risquent d'endommager les crépines. Cependant, un trou ouvert dans une formation rocheuse dure et stable

pourrait théoriquement être nettoyé en grattant tout d'abord les parois pour détacher un dépôt de boue particulièrement réfractaire, puis par pistonnage ou nettoyage au jet. Il est possible de fabriquer des grattoirs pour parois à partir d'anneaux en acier, avec des pointes de métal souple soudées autour de la circonférence extérieure. L'anneau de pointes ressemble à un hérisson et fonctionne de la même manière : fixé à l'extrémité du train de tiges, il permet de gratter les parois en le faisant descendre dans le forage tout en lui imprimant un mouvement rotatif.

En l'absence de graves problèmes techniques durant la construction du forage, les travaux, y compris le développement, durent en principe environ une semaine.

6.3 Finitions du forage

6.3.1 Avant-puits

Une fois le nettoyage du forage terminé, la dernière tâche consiste à construire un avant-puits, qui permet de protéger le forage contre la contamination de surface. Il devrait également relever de la responsabilité de l'entreprise de forage et figurer sur le contrat de travail. Les deux derniers mètres de l'espace annulaire au minimum (en principe la section qui était protégée par le tube guide durant le forage) devraient être nettoyés et élargis, éventuellement en carré, autour du tubage définitif. En dessous, l'espace annulaire du forage au-dessus du massif filtrant devra être remblayé par un bouchon composé de gravier ordinaire, de gravillons, de granulés de bentonite, ou simplement de déblais du forage. Le nouveau trou réalisé pour l'avant-puits peut ensuite être rempli de ciment jusqu'au niveau du sol, ou de préférence légèrement au-dessus (voir les schémas de construction, annexe 3). Pour les forages où le niveau statique de l'eau est élevé, et qui sont couverts par une couche superficielle perméable, on ne peut pas faire grand-chose d'autre que de prendre soin à ne pas renverser d'eau usée autour du trou. Ensuite, le responsable devrait

confirmer la profondeur totale du forage et le niveau statique de l'eau à l'aide d'une sonde piézométrique. Enfin, le haut du tubage doit être scellé à l'aide d'un couvercle verrouillé ou d'une plaque soudée, où l'on peut inscrire le numéro d'identification du forage.

6.3.2 Pompes et essais de pompage

Une fois le forage terminé et l'avant-puits mis en place, un essai de pompage est effectué. Il a pour objectifs de :

- mesurer le débit du forage ;
- déterminer le rendement du forage, ou la variation de sa production à différents débits ;
- quantifier les caractéristiques de l'aquifère, notamment la transmissivité, le coefficient de perméabilité et la capacité de stockage.

Dans les endroits reculés, un responsable ou un hydrogéologue aura peut-être besoin de certaines indications sur le rendement d'un forage si le type de pompe à installer n'a pas encore été déterminé. Le débit de purge obtenu durant le développement indiquera au responsable si un forage particulier a un bon potentiel de rendement. Pour les forages à faible débit (moins de 0,5 litre/seconde), une pompe à main suffira et il n'y aura pas besoin de les tester. On ne devrait donc pas perdre de temps à le faire. Les forages à très faible débit (moins de 0,2 litre/seconde), mais avec un niveau d'eau élevé (par ex., 10 mètres ou moins) ne seront pas forcément adaptés à la production d'eau à long terme, mais peuvent indiquer qu'il existe dans cette zone des eaux souterraines, qui pourraient être exploitées par des puits ordinaires. Ici, la participation de la communauté devrait être encouragée.

Aux fins de cette discussion, nous partons du principe que le forage en question est très éloigné de tout autre puits ou forage de production, qu'il n'existe pas d'ouvrages d'observation dans le voisinage immédiat et qu'il n'y a pas d'informations antérieures utiles concernant des essais de pompage ou les caractéristiques d'un aquifère. Le

responsable ne peut s'appuyer que sur le log de forage, le débit de purge, et ses propres connaissances ou son expérience. Dans ces situations, il est possible de concevoir un programme simple d'essais de pompage en utilisant le débit de purge comme débit maximal d'extraction sûre présumé. Les principaux essais de pompage sur un seul puits comprennent le pompage à débit variable et/ou constant et la mesure des variations (« rabatement ») du niveau de l'eau durant le pompage et la remontée. La remontée est la vitesse à laquelle le niveau de l'eau dans le forage remonte jusqu'au niveau statique une fois que la pompe a été arrêtée. On peut obtenir plus d'informations en effectuant des tests de mesure par débit variable (ou « paliers de débit ») et à débit constant, car ces tests sont complémentaires.

Les tests à débit constant et par paliers de débit évaluent la performance du forage, mais le test à débit constant peut également fournir des informations sur la performance à long terme du puits, les caractéristiques de l'aquifère, voire la géométrie de l'aquifère. Si l'on désire uniquement savoir si une pompe donnée peut être utilisée à long terme sur un forage particulier, un test simple, consistant à faire fonctionner cette pompe (de préférence à un débit inférieur au débit de purge) dans le puits, suffit, mais faites attention au surpompage. Ce « test » ne fournira aucun renseignement sur le forage ou l'aquifère si le niveau de rabatement n'est pas enregistré. Les mesures de rabatement effectuées durant les phases de pompage et de remontée sont reportées sur une échelle de temps logarithmique en minutes (voir annexe 4).

A) Essais de pompage

Pour les essais de pompage, il faut en général que le débit de pompage puisse être régulé relativement facilement et précisément. Les deux méthodes les plus courantes consistent à utiliser soit une pompe électrique immergée en réglant le tuyau de refoulement à la surface à l'aide de vannes, soit une pompe à rotor (comme la très célèbre

Une autre pratique courante (que l'auteur a souvent observée en Afrique australe) consiste à utiliser un système monté sur camion, qui comprend un petit moteur de voiture et une boîte de vitesses et qui actionne la tête d'entraînement d'une pompe Mono fixée au sommet du forage. La vitesse de la pompe est régulée par la vitesse du moteur et la sélection de la vitesse.

« pompe Mono »), actionnée par un moteur depuis la surface. Les deux types de pompe sont introduits dans le forage au bout d'une conduite de refoulement jusqu'au niveau de pompage prévu.

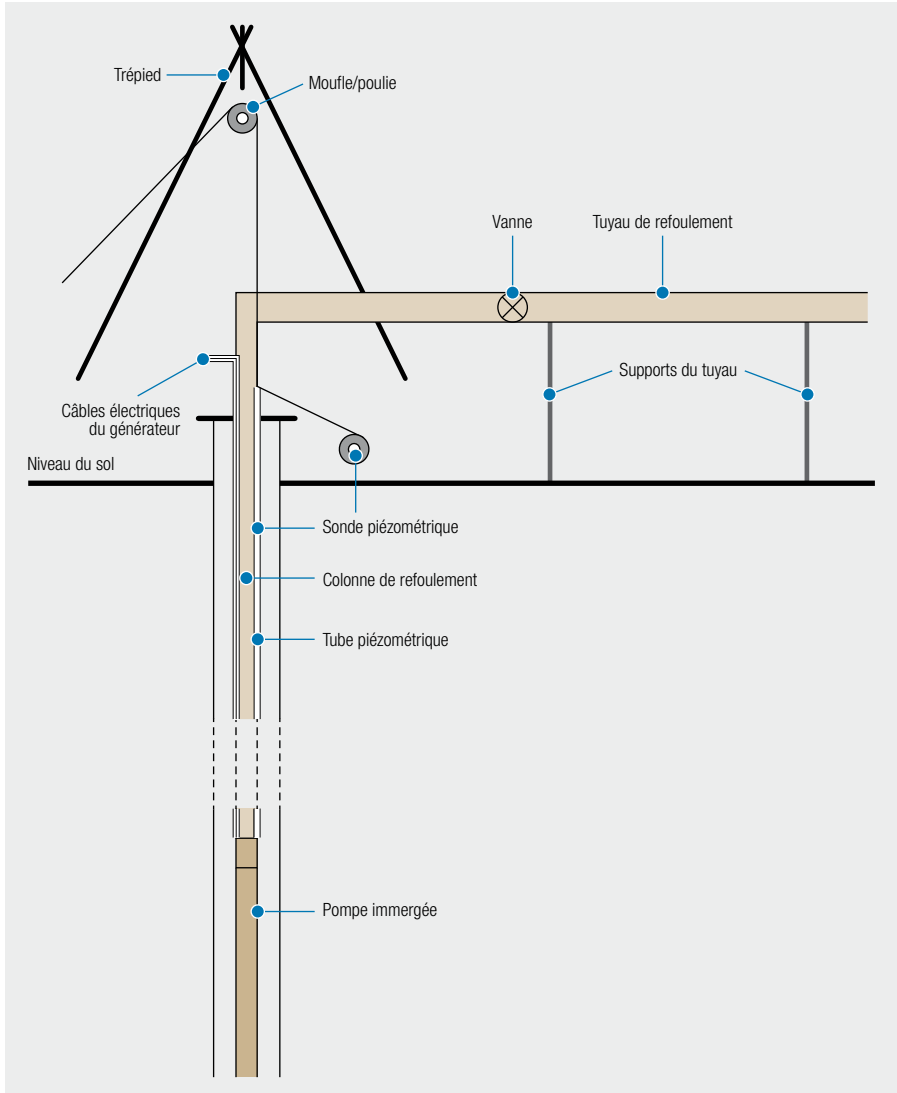


Figure 16. Installation d'essai de pompage typique (avec pompe électrique immergée). Pas à l'échelle

Les pompes électriques immergées, qui fonctionnent souvent uniquement sur courant alternatif triphasé, requièrent un générateur et un système de commande (boutons électriques, fusibles, etc.) adéquats. Comme il s'agit essentiellement de pompes à débit constant, le débit de pompage doit être régulé à l'aide d'une vanne (ou de plusieurs vannes) : un robinet à soupape est nécessaire pour réguler le débit (par opposition au robinet à opercule ou sphérique, souvent utilisé, qui n'est en fait qu'un robinet ouvert/fermé, et dont l'utilisation n'est pas recommandée pour réguler le débit).

Les pompes mécaniques sont actionnées depuis la surface par un axe, qui est lui conduit par une boîte de vitesses et un arbre de transmission ou des courroies de moteur. Cette méthode permet de varier la vitesse de rotation (et le débit) de la pompe en modifiant la vitesse du moteur. De nombreuses entreprises de forage ou d'essai de pompage fournissent l'un ou l'autre des systèmes, voire les deux. Elles proposent par exemple différentes sortes de pompes immergées, dont une peut correspondre au débit de purge du forage.



Figure 17. Machine pour essai de pompage consistant en une pompe à rotor (Mono) actionnée par une courroie, Zimbabwe

Dans tous les cas, la pompe et les sections de la conduite de refoulement en acier galvanisé sont abaissées dans le forage à l'aide d'un tripode d'acier solide, avec un câble d'acier, des poulies, un palan à chaîne ou un treuil. Pour pouvoir facilement mesurer le niveau de l'eau durant les phases de pompage et de remontée du test, on fixe un tuyau en plastique souple, ouvert à l'extrémité inférieure, appelé « tube piézométrique » à la conduite de refoulement (par ex. à l'aide de ligatures de câbles, de ruban adhésif ou de fil de fer) et celle-ci est introduite dans le trou. Une sonde piézométrique est introduite dans ce tuyau pour mesurer les variations du niveau de l'eau. Le débit durant le test peut être mesuré en chronométrant le temps nécessaire pour remplir un seau ou à l'aide d'un débitmètre intégré dans le tuyau de refoulement. L'eau extraite devrait être dirigée vers le bas et loin du forage (à plus de 100 mètres). La figure 16 montre le schéma d'une installation typique d'essai de pompage, et la figure 17 une machine en fonctionnement au Zimbabwe.

L'augmentation du débit entre paliers enchaînés (sans arrêter la pompe) devrait se faire aussi rapidement et doucement que possible. Pour y parvenir, on peut effectuer un exercice – avant l'essai lui-même – afin de s'assurer que tout est prévu, notamment les vitesses du moteur ou la position des vannes. Les essais effectués après une période préalable de pompage ne devraient débiter qu'une fois que le rabattement est revenu à un niveau proche du niveau statique de départ. Il est possible d'utiliser des paliers non enchaînés (avec arrêt de la pompe entre chaque palier) si on laisse remonter le niveau de l'eau entre chaque palier.

B) Essai de pompage par paliers

Si le débit de purge a été mesuré à un débit de Q litres par seconde, il peut être conseillé d'effectuer un essai de pompage par paliers de la manière suivante : pomper d'abord le forage pendant une heure à un débit de $Q/4$ litres par seconde (palier 1, débit q_1), puis pendant une autre heure à $Q/2$ litres par seconde (palier 2, débit q_2), puis pendant une troisième heure à $3/4 Q$ litre par seconde (palier 3, débit q_3) et, enfin, pendant une quatrième heure à $1,25 Q$. Le quatrième palier (débit q_4) devrait légèrement surpomper le forage. Ce test doit être interrompu si le rabattement s'approche de l'orifice d'aspiration.

Après ce test simple par paliers, si le forage se stabilise à un niveau dynamique plus haut que l'extrémité supérieure de la crépine au débit q_3 , mais pas au débit q_4 , cela signifie que le débit de purge Q est probablement le meilleur niveau de production. Cependant, suivant la demande, le débit q_3 pourrait être plus sûr, car il tient compte de toute diminution potentielle future du niveau d'eau ou de la détérioration du forage. Si le niveau dynamique se stabilise juste au-dessus de la crépine à q_3 , un débit de production de q_2 (ou un peu plus) pourrait être plus sûr.

C) Essai de pompage à débit constant

Une fois que ce test a permis d'estimer le débit de production, il faudrait le confirmer en pompant à un débit constant pendant au moins 24 heures (pour les forages à haut débit, le pompage durera 48 heures). C'est ce qu'on appelle un test à débit constant. Le rabattement devrait être mesuré à intervalles réguliers tout au long du test. À la fin du test, dès que la pompe est arrêtée, le niveau de l'eau devrait être surveillé à mesure qu'il remonte (jusqu'au niveau statique de l'eau). Si le niveau de pompage se stabilise à un niveau sans danger au-dessus des crépines et de l'orifice d'aspiration, cela signifie que ce débit de production est approprié. L'annexe 4 propose un exemple de fiche d'essai de pompage. De nombreuses publications traitent de l'analyse des données des essais de pompage et de leur applicabilité à la modélisation d'aquifères. Même si un programme de forage particulier ne requiert pas ce type d'analyses, les données du terrain devraient être considérées comme une ressource précieuse et conservées, car elles pourraient être utiles à l'avenir. Par exemple, si un des forages connaît une baisse de rendement et doit être réhabilité, les résultats d'un essai de pompage effectué après la réhabilitation pourraient alors être comparés avec le premier essai afin d'évaluer le degré de détérioration permanente.

D) Vérification de la verticalité

Une fois l'équipement de l'essai de pompage retiré, il convient de vérifier que le forage est vertical et droit. Cela

se fait en général en insérant et en faisant descendre dans le trou une tige ou un tuyau d'acier parfaitement droit de 12 mètres de long, dont le diamètre externe devrait mesurer au maximum 13 mm (environ 0,5 pouce) de moins que le diamètre interne de la principale ou de la plus longue section du tubage (c'est-à-dire là où la pompe se trouvera, à moins qu'il soit prévu d'installer une pompe à main).

E) Désinfection

Enfin, pour autant qu'il ait passé les tests ci-dessus, le forage devrait être entièrement désinfecté à l'aide d'une solution à forte teneur en chlore, par exemple du HTH, laissant une concentration de chlore résiduel de 50 mg/litre pendant au moins quatre heures. Le tableau 8 indique la quantité de produit chloré à ajouter à 20 mètres de tubage rempli d'eau pour divers diamètres. Le forage peut ensuite être rebouché à l'aide du couvercle à verrou ou de la plaque soudée déjà en place.

Tableau 8. Quantité de produit chloré nécessaire pour produire une solution de 50 mg/l dans 20 mètres de tubage rempli d'eau²

Diamètre du tubage (en pouces)	Volume par 20 m (en m ³)	65 % HTH (poids sec)* (en g)	25 % chlorure de chaux (poids sec)* (en g)	5,25 % hypochlorite de sodium (Jick, eau de javel) (récipient gradué) (en l)
2	0,04	3,74	9,31	0,04
4	0,16	12,98	37,18	0,20
6	0,36	37,18	74,10	0,39
8	0,65	55,80	129,84	0,66
10	1,01	74,10	204,59	1,11
12	1,46	111,48	297,70	1,57
16	2,59	204,59	520,66	2,49
20	4,05	316,07	799,34	4,20
24	5,84	445,90	1171,15	5,70

* Lorsque de la poudre est utilisée, il faudrait d'abord en faire une solution dans un conteneur d'eau avant de l'introduire dans le forage.

6.3.3 Diagraphie géophysique

On peut obtenir à distance des informations sur les caractéristiques structurelles et les formations géologiques d'un forage, à l'aide de techniques de diagraphie géophysique. La diagraphie de forage a pour objet de mesurer les propriétés des roches en place et des fluides. Les diagraphies géophysiques peuvent fournir des informations sur la lithologie, la quantité d'eau dans une formation, la densité de la formation, les zones de débit entrant, la qualité de l'eau et d'autres paramètres *in situ* qui ne peuvent pas être déduits d'échantillons fortement remaniés. Une série de diagraphies géophysiques, comprenant des méthodes de pénétration profonde, complètera plus ou moins la description technique d'un forage, mais la diagraphie géophysique est un domaine spécialisé qu'il vaut mieux laisser aux entreprises géophysiques ou aux consultants en hydrogéologie. Un dispositif de diagraphie comprend une alimentation électrique, un dispositif de réception / traitement des données et un câble fixé à un treuil à moteur qui fait descendre des sondes spéciales dans le forage pour en mesurer les diverses propriétés. Le câble contient plusieurs électrodes qui transmettent les signaux au récepteur. Les données, traitées par ordinateur, peuvent être présentées sous forme de fiche géophysique sur un graphique, qui devrait comprendre un certain nombre de données sur la structure, la formation et les fluides. Des kits de logiciels spécialisés permettent de manipuler, d'interpréter et de comparer les données. Une diagraphie géophysique à plusieurs sondes peut fournir un grand nombre d'informations sur les conditions souterraines à l'intérieur et autour d'un forage.

7. FRAIS DE FORAGE ET DE CONSTRUCTION

En raison de la concurrence commerciale, les entreprises de forage sont souvent réticentes à donner des prix à moins qu'on puisse fournir des détails spécifiques sur les conditions géologiques et la profondeur prévue des forages sur les sites potentiels. Elles peuvent, par exemple, demander qu'une étude hydrogéologique du site soit conduite au préalable. Pour ces travaux préliminaires, il faudrait essayer d'engager un consultant indépendant plutôt qu'un consultant proposé par – ou affilié à – une entreprise de forage. Au Royaume-Uni, cela peut revenir à environ 200 à 300 livres sterling par jour – la durée du travail dépendant de la taille ou de la complexité du site –, en plus des coûts de location de tout équipement d'examen qui pourrait s'avérer nécessaire.

Les entreprises de forage, du moins au Royaume-Uni, ne manquent jamais une occasion de signaler que les forages peuvent faire baisser le prix de l'eau jusqu'à 80% et que le coût de l'eau de forage n'est que de deux à trois *pence* le mètre cube, contre une livre sterling dans certaines régions pour un approvisionnement normal (cité par W.B. & A.D. Morgan, de Powys, Royaume-Uni). Durant les recherches menées pour cette revue, l'auteur a eu beaucoup de difficultés à obtenir des prix des entreprises de forage, mais vous trouverez ici quelques exemples trouvés sur Internet.

Les entreprises de forage calculent en général le prix selon un système d'unités de temps et en fonction du matériel utilisé. Elles n'offriront un forfait que si l'entrepreneur connaît très bien l'endroit en question et sait exactement à quoi s'attendre. Les prix donnés comprendront généralement les tubes/crépines PVC de base ; mais peut-être pas le massif filtrant, ni l'installation de la pompe. Un forfait typique, quelle que soit la profondeur du forage, a été obtenu aux États-Unis : environ 15 000 dollars américains (y compris les tubes/crépines PVC). Au Nigéria, un conseiller immobilier de Lagos cite un prix de 350 000 nairas nigériens par forage (industriel, avec machinerie lourde ; le prix comprend probablement le tubage et les crépines en PVC

mais pas la pompe), ce qui revient à environ 2 240 dollars américains au taux actuel (2011).

Un autre exemple africain est le devis de *Water Africa Services Ltd.* de Nairobi, Kenya, qui répondait à un appel d'offres pour la réalisation de 10 forages à Jonglei, Sud-Soudan (début en 2009). L'entreprise citait un prix global de 146 960 dollars américains (comprenant les tubes/crépines, mais pas la pompe). Ce contrat était pour le ministère des Coopératives et du Développement rural, Juba.

Les programmes des grands donateurs, notamment ceux soutenus par la Banque mondiale, qui finance la plupart des forages actuellement réalisés au Malawi, sont prêts à payer jusqu'à 15 000 dollars par forage. Comme ce n'est en général pas le gouvernement qui paie la note des projets de forage dans les pays en développement, il n'est pas nécessairement dans son intérêt de faire baisser ces prix. Les frais effectifs de forage ne tiennent généralement pas compte de la nécessité de faire participer la communauté à toutes les étapes : de la sélection du site au forage, à l'installation de la pompe et à son utilisation. Chacune de ces phases requiert des compétences en matière de mobilisation et de formation des communautés.

Dans le nord du Pakistan, les systèmes de forage opérés par de petites entreprises locales sont encore utilisés pour réaliser des forages peu profonds pour pompes à main. Ces entreprises ne demandent qu'environ 500 roupies, soit environ quatre livres sterling, par mètre de forage. Le prix du tubage et des pompes n'est pas compris. Le prix des puits ordinaires s'élève à environ 1000 roupies le mètre. Vous trouverez des prix récents pour l'achat de tubes et de crépines au Royaume-Uni à l'annexe 2.

7.1 Achat d'une foreuse

Suivant l'ampleur du programme de forage prévu, il peut être tentant d'envisager d'acheter une foreuse de façon à ne pas dépendre d'entrepreneurs externes et à utiliser au mieux le budget disponible.

Les machines commerciales industrielles ne sont généralement pas accessibles aux organisations humanitaires, mais les machines portables sont abordables et leur prix va d'environ 10 000 à 100 000 dollars américains, ce qui en fait une option intéressante.

Cependant, si une organisation prévoit d'investir dans une petite foreuse (de type PAT ou Eureka, par exemple), elle doit d'abord effectuer une analyse économique approfondie.

L'achat d'une machine et son transport jusqu'à votre entrepôt ne représentent qu'une petite partie des frais encourus.

Il faut constituer et entretenir un stock de pièces détachées et de consommables. Il faut en outre une chaîne logistique pour approvisionner la campagne de forage, et des véhicules pour le transport de l'eau, du matériel et du personnel, voire parfois pour la sécurité. Vous devrez trouver et former des foreurs qualifiés, notamment plusieurs remplaçants. Si l'organisation ne possède pas d'employé qui s'y connaisse en forage, elle devrait reporter la planification de tout programme de forage jusqu'à ce qu'elle ait engagé un consultant. Très souvent, il faut déposer des demandes de permis de forage et l'entreprise doit parfois être enregistrée en tant que telle. Une fois que la campagne de forage a débuté, il est très coûteux de l'interrompre ; il faut tout faire pour l'éviter.

Enfin, vous avez la possibilité de le faire vous-mêmes. Cela dépendra de vos capacités (savoir-faire disponible) et de l'ampleur du programme de forage (nombre de forages et possibilité de continuer d'utiliser la foreuse pour d'autres programmes). Après un certain nombre de forages (à déterminer), l'investissement et les efforts initiaux sont rentables.

7.2 Taux de réussite

Le taux de réussite potentiel doit aussi être pris en compte dans l'équation des coûts d'un projet de forage. La plupart des professionnels estiment qu'un taux de réussite de 70-80% est satisfaisant.

Un programme de 30 forages profonds a aussi été mené à bien dans la même région avec un taux de réussite de 94%. Dans les deux projets, les emplacements des forages avaient été déterminés par des études détaillées des sites, qui comprenaient une exploration géophysique. Les puits peu profonds (profondeur moyenne: 21 mètres) coûtaient environ 5000 dollars américains chacun; les forages plus profonds (profondeur moyenne: 46 mètres), environ 10 625 dollars chacun. Le forage était effectué à l'aide d'une PAT 301.

Il est clair que les forages réalisés à l'aide de petites machines reviennent beaucoup moins cher: on a trouvé un prix d'environ 3000 dollars pour un forage (profondeur ou dimensions non précisées) réalisé à l'aide d'une Eureka Port-a-Rig (voir section 3.1).

Comme mentionné au début de cette revue, un projet d'approvisionnement en eau peut être considérablement amélioré – et son coût fortement réduit – en localisant les forages déjà présents dans la zone du projet et, si possible, en les remettant en état.

En fait, le directeur d'une société de conseil sud-africaine en eaux souterraines, qui a employé l'auteur en tant qu'hydrogéologue au Zimbabwe dans les années 1980, a admis qu'il maintenait le taux de réussite à un niveau délibérément bas, afin de ne pas donner l'impression que leur travail était trop facile!

En 2006, TGS Water Ltd., de Kampala, a réalisé en tout 80 forages peu profonds dans les districts d'Oyam, Apac, Dokolo et Lira, dans le nord de l'Ouganda. Les forages étaient réalisés de façon à atteindre des formations résistantes peu profondes, et exploitaient donc apparemment des aquifères proches de la surface dans la zone altérée. Ici, le taux de succès des forages était de 71%.

8. DÉTÉRIORATION DES FORAGES

Rien n'est éternel et les puits d'eau ne font pas exception. La durée de vie d'un forage de production sera réduite s'il n'est pas correctement conçu, pas construit pour produire le rendement maximal, ou s'il a été surpompé. De nombreux puits de production sont rarement surveillés ou entretenus. Ils sont négligés jusqu'à ce qu'un problème survienne. Mais si un forage est correctement dimensionné, construit avec les bons matériaux et bénéficie d'une attention régulière, il peut produire de l'eau pendant au moins 50 ans.

Les principales causes de la détérioration ou de l'épuisement des forages comprennent :

A) Baisse du niveau de l'eau

La production d'un forage ou d'un champ de captage peut décliner en raison d'une baisse du niveau de la nappe phréatique, qui peut être due à des causes naturelles telles qu'une sécheresse, mais aussi à la détérioration du puits et au surpompage (rabattement excessif). Une baisse du niveau de l'eau peut entraîner l'arrêt automatique des pompes immergées.

B) Panne mécanique

Le rendement des forages diminue à mesure que les pièces des pompes s'usent, se corrodent ou se colmatent, et que les crépines sont partiellement colmatées par des accumulations de matières organiques et inorganiques nuisibles et des dépôts de tartre. Si les pompes ne sont pas arrêtées avant qu'elles commencent à aspirer de l'air, elles subiront des dommages irréparables. Il est possible d'empêcher partiellement (voire en grande partie) la diminution ou l'interruption de la production par un programme d'entretien et de réhabilitation des puits.

C) Incrustation

La plupart des eaux souterraines ne sont que moyennement corrosives, voire pas du tout, donc la corrosion n'est généralement pas un problème si des tubes et des crépines en

plastique et en acier de bonne qualité (notamment en acier inoxydable) ont été installés. La principale cause de détérioration est l'accumulation d'incrustations autour des ouvertures des crépines, ce qui réduit le rendement du forage. À mesure que le forage est exploité, la pression diminue en raison du rabattement local, alors que la vitesse et la turbulence de l'écoulement autour du forage augmentent. Dans cette zone agitée, l'eau libère du dioxyde de carbone, ce qui réduit la solubilité de certains composants de l'eau, tels que le carbonate de calcium. L'incrustation résulte principalement de la précipitation de carbonates insolubles, de bicarbonates, d'hydroxydes, ou de sulfates de calcium, de magnésium, de sodium, de manganèse ou de fer. Cependant, ces dépôts sont rarement composés d'un seul minéral. Normalement, le niveau de fer dissous dans les eaux souterraines est faible, mais de légères variations dans la composition chimique de l'eau, notamment l'acidification due à la dissolution de dioxyde de carbone ou de substances organiques (acides humiques) peuvent provoquer une augmentation de la concentration de fer (jusqu'à plusieurs dizaines de milligrammes par litres). Le fer restera sous sa forme soluble (ferreuse) à moins d'une augmentation du pH (alcalinité, équivalant à une baisse de l'acidité) ou de l'Eh (potentiel redox) de l'eau. Une plus forte oxygénation de la zone turbulente peut provoquer une précipitation du fer par oxydation, de l'état ferreux (Fe^{2+} , soluble) à l'état ferrique (Fe^{3+} , insoluble) dans la zone de la crépine. D'importants dépôts minéraux peuvent se former sur la partie supérieure des crépines qui est exposée à l'air en raison d'un rabattement excessif. Le limon inorganique et l'argile aggravent souvent le problème, mais des dépôts organiques peuvent aussi entrer en jeu. L'oxydation du fer, de l'état ferreux à l'état ferrique, sur les parois du forage peut favoriser la croissance de certaines bactéries. Le cycle de la vie des ferrobactéries provoque l'apparition de vase organique. Ces organismes vivent dans les eaux souterraines en métabolisant l'ammoniac, le méthane ou le dioxyde de carbone, transformant à nouveau le fer en dépôts de sels insolubles (principalement en hydroxyde), ce qui renforce l'incrustation.

La biopollution par le fer est un processus complexe découlant des interactions entre le milieu de l'aquifère et les structures du forage. Les substances microbiennes consistent en colonies de bactéries filamenteuses, tapis de cellules et gaines de biofilm (que les cellules secrètent pour se protéger), souvent d'une consistance vaseuse, mais qui peuvent se durcir avec le temps. Ces incrustations nuisent au rendement et au débit spécifique, colmatant les tuyaux, les massifs filtrants, les crépines et les pompes. Elles peuvent cimenter un massif filtrant jusqu'à ce qu'il ressemble à du béton. Elles favorisent la corrosion et réduisent la qualité de l'eau, et les mesures correctrices seront sans doute moins efficaces une fois qu'elles seront durcies. Si une incrustation a vieilli et s'est recristallisée, il sera extrêmement difficile de la détacher et de l'éliminer.

D) Corrosion

Le processus de corrosion le plus courant est électrochimique: le fer (ou un autre métal) est dissous et précipité une nouvelle fois sous forme de dépôt d'hydroxyde. Dans un puits d'eau, la corrosion touche le plus souvent des imperfections physiques localisées sur les tuyaux et les crépines en métal. Ce processus peut être favorisé par une forte salinité, une température élevée, l'oxygène, le dioxyde de carbone, l'hydrogène sulfuré et les acides organiques (dus à la tourbe ou à la pollution). La corrosion peut perforer les crépines et tubes métalliques, affaiblissant la structure et permettant aux polluants (voire au contenu du massif filtrant) de pénétrer dans le forage. Comme mentionné ci-dessus, il est possible de ralentir l'incrustation ou la corrosion en installant des crépines ayant le plus grand coefficient d'ouverture possible, afin de réduire le débit de pompage et la vitesse d'entrée, et en nettoyant ou en redéveloppant régulièrement le forage.

9. SUIVI DU FORAGE

Cette section présente un bref aperçu des techniques qui permettent d'effectuer une évaluation détaillée d'un forage. Vous trouverez d'autres informations dans les références qui figurent à l'annexe 7B.

Une surveillance continue du rendement d'un forage peut être d'un bon rapport coût-efficacité, car elle permet de repérer les problèmes avant qu'ils ne s'aggravent. Les programmes d'entretien devraient comprendre des visites régulières sur le terrain, la collecte d'échantillons d'eau (à des fins d'analyses chimiques/microbiennes), des mesures du niveau de l'eau et un suivi de routine effectué à l'aide de simples essais de pompage par paliers de débit. Les données recueillies peuvent être comparées avec celles obtenues quand le puits était neuf ou lors du dernier contrôle. Il suffit d'un calendrier régulier de tests comprenant un simple essai par paliers de débit chaque année, ainsi que des travaux d'entretien si on observe des signes de détérioration. Dans les zones à faible risque (en termes d'incrustation ou de corrosion) des travaux d'entretien devront peut-être être effectués à quelques années d'intervalle. Il convient d'ériger autour du forage une barrière qui peut être verrouillée, afin d'empêcher qu'on y touche et d'éviter tout dommage accidentel ou volontaire. Le tableau 9 présente les symptômes à relever dans un programme de surveillance, ainsi que leurs causes et certaines mesures correctrices possibles.

Il faudrait recruter du personnel local et le former à la surveillance des forages et à la réparation des pompes (en particulier des pompes à main), surtout dans les zones où l'interruption de l'approvisionnement en eau aurait les conséquences les plus graves. Cela s'applique surtout aux forages qui approvisionnent des campements ou des établissements institutionnels dans des régions reculées arides ou semi-arides, et là où il y a un risque de détérioration rapide du forage.

Tableau 9. Suivi du forage : symptômes, causes et solutions

Symptôme	Causes	Mesures correctrices
Baisse régionale du niveau de l'eau souterraine	Facteurs régionaux, par ex. mouvements du sol, sécheresse, pompage à grande échelle, déforestation intensive	Abaisser l'orifice d'aspiration Approfondir le forage Réaliser un nouveau forage (plus profond)
Baisse localisée du niveau de l'eau souterraine	Surpompage Crépines ou massif filtrant bouchés	Vérifier/comparer les données des essais de pompage antérieurs Réduire le débit de pompage Réhabiliter : inspecter les crépines, développer par pistonage pour nettoyer les crépines et le massif filtrant
Modification de la qualité de l'eau (chimique)	Pollution chimique Intrusion d'eau saline Mélange d'aquifères	Analyser l'eau. En cas de danger, cesser la production du forage et réévaluer la situation
Modification de la qualité de l'eau (biologique)	Pollution Changement dans la composition chimique de l'eau	Analyser l'eau. En cas de danger, cesser la production du forage. Si temporaire, dénoyer et désinfecter le forage.
Corrosion/incrustation inhabituelle de l'aménagement de surface du forage	Qualité de l'eau, par ex. carbonate (eau dure), eau acide, ferrobactéries	Enlever la pompe, inspecter le forage. Réhabiliter
Diminution du débit (niveau de pompage inchangé)	Pompe défectueuse Tuyaux bouchés (incrustations)	Enlever et inspecter la pompe Inspecter les tuyaux ; les remplacer si nécessaire
Bruit ou vibration inhabituels (pompe immergée)	Pompe endommagée / défectueuse	Enlever et inspecter la pompe Inspecter le forage

A) Surveillance de la qualité de l'eau

Une analyse chimique de l'eau du forage devrait donner une indication du risque de dommages aux structures du forage. L'état physique du système d'extraction d'un forage peut donner une idée de l'évolution à l'intérieur du forage lui-même. Si on constate une corrosion ou une incrustation inhabituelle et considérable sur la structure des aménagements de surface du forage, il est probable que la même chose se produise à l'intérieur. Il est particulièrement important de surveiller la qualité de l'eau si les forages se trouvent à proximité de zones à forte densité de population ou dans des zones côtières. Le premier cas présente un risque de pollution (chimique ou biologique), tandis que les zones côtières risquent d'être victimes d'une intrusion d'eau saline provenant d'une zone de transition fluctuante

d'eau douce et d'eau de mer. Dans ce dernier cas, bien sûr, il suffit de goûter l'eau pour confirmer le problème, mais une analyse régulière de la conductivité ou des solides dissous totaux (SDT) fournira des données permettant de faire des prévisions.

L'eau distillée a une conductivité de 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$,

**bonne eau douce <200 à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$,
eau saline >6 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
(S = Siemens = 1 Ω^{-1})**

La classification équivalente en SDT est:

**eau douce: 0 à 1000 mg/l;
eau saumâtre: 1000 à 10 000 mg/l;
eau saline: 10 000 à >100 000 mg/l.**

La référence 11 à l'annexe 7B présente les détails d'un rapport, publié par CIRIA, qui fournit des recommandations de meilleures pratiques pour le suivi, l'entretien et la réhabilitation des forages équipés d'une pompe à main.

La surveillance des forages devrait comprendre des essais réguliers par paliers de débit, qui peuvent être analysés de façon plus approfondie afin de déterminer les paramètres hydrodynamiques de base des aquifères. Le rabattement dans un forage est essentiellement la somme des pertes qui se produisent lorsque l'eau passe de l'aquifère au forage. Une analyse mathématique des données du test par paliers de débit permet de définir ces pertes, ainsi que la relation entre le rabattement et le débit du forage testé. Ces données peuvent donner une indication du rendement d'un forage (et donc de toute diminution du rendement au fil du temps).

10. RÉHABILITATION DES FORAGES

La réhabilitation désigne les mesures prises pour réparer un forage dont la productivité a faibli ou a cessé en raison d'un manque de surveillance et d'entretien de la pompe et/ou de la structure du puits. Le problème est souvent d'ordre financier ou logistique – une conséquence de l'isolement de l'endroit et, éventuellement, d'un conflit qui empêche d'y accéder. Les pompes de surface, notamment les pompes éoliennes ou les pompes à main, tombent souvent en panne pour des raisons purement mécaniques – tige cassée ou tuyau d'exhaure corrodé, par exemple. Par ailleurs, les forages abandonnés s'ensavent et des objets tombent à l'intérieur. Malheureusement, si un forage est entièrement obstrué par des débris solides, tels que pierres et pièces de métal (ce qui n'est pas rare), il est probablement complètement perdu. Les forages existants sont en principe bien situés, car ils ont été réalisés pour de bonnes raisons. Par conséquent, il vaut presque toujours la peine de les réhabiliter.

On peut estimer en général que le coût d'une simple réhabilitation (sans remplacement du tubage) reviendra à environ 10% du prix d'un nouveau forage.

10.1 Quand réhabiliter

Tous les forages qui existent déjà dans la zone d'un projet devraient être inspectés pour déterminer s'il serait possible de les réhabiliter, à moins qu'ils se trouvent sur des terrains privés. Il se peut qu'il n'y ait pas de besoins supplémentaires en eau, mais comme les forages offrent un accès aux eaux souterraines, ils peuvent servir d'ouvrages d'observation pour surveiller le niveau local de l'eau. Les forages abandonnés peuvent représenter une voie de contamination des aquifères ou permettre aux eaux souterraines de différents aquifères de qualité diverse de se mélanger. Ils peuvent aussi constituer un danger physique pour, par exemple, les enfants du coin, en particulier s'ils sont ouverts et que leur diamètre est considérable. Les forages abandonnés sont potentiellement utiles en tant que points de surveillance des eaux souterraines, même s'il n'est pas possible de les

réhabiliter à des fins de production. Mais les trous qui ne peuvent pas être réparés devraient être comblés à l'aide de matériaux propres, inertes et non polluants tels que gravier, sable, galets, béton, bentonite, roches ou laitier de ciment.

Un forage qui est resté sans protection – sans couvercle ou structure de surface – pendant quelque temps sera presque certainement perdu en raison, par exemple, d'objets que des enfants ont laissé tomber à l'intérieur. Si une obstruction est atteignable depuis la surface, on pourra se faire une idée de sa solidité en la sondant avec une barre en métal dur. Les matériaux fins et meubles peuvent être éliminés à l'aide d'air comprimé (voir ci-dessous); si c'est faisable, une réhabilitation totale est peut-être possible. Si le forage était protégé par un couvercle et est apparemment clair, il faudrait vérifier sa profondeur avec un fil à plomb, contrôler son niveau statique à l'aide d'une sonde piézométrique, et examiner quelle a été la méthode de construction utilisée et l'état dans lequel il se trouve à l'intérieur à l'aide d'une caméra en circuit fermé.

Avant d'effectuer une réhabilitation, il est conseillé de recueillir des échantillons et d'analyser les eaux souterraines locales (si possible) afin de s'assurer qu'elles ne sont pas trop chimiquement agressives.

10.2 Méthodes de réhabilitation

Le processus de réhabilitation de base devrait comprendre les étapes principales suivantes, dans cet ordre :

- collecte d'archives et d'informations (des services des eaux, des entreprises de forage, des organisations humanitaires, etc.) sur le dimensionnement du forage;
- inspection à l'aide d'une caméra en circuit fermé;
- dissolution des dépôts et des incrustations qui colmatent les orifices;
- élimination du limon et des débris par nettoyage par pistonnage et *air lift*;
- désinfection du forage;
- test par paliers de débit.

10.2.1 Inspection à l'aide d'une caméra en circuit fermé

Avant de demander une inspection par caméra en circuit fermé (CCTV), il convient d'essayer de trouver des informations sur la conception et la construction du forage, car cela pourrait permettre de gagner beaucoup de temps. Cependant, dans certains pays, les archives de la conception des forages seront difficiles à trouver.



Figure 18. Dommages au tubage tels qu'ils apparaissent filmés par une caméra en circuit fermé

En général, la réhabilitation peut comprendre une première investigation à l'aide d'une caméra avant le dessiltage par injection d'air classique. Une deuxième inspection à l'aide d'une caméra devrait ensuite être effectuée pour vérifier l'efficacité de l'opération de dessiltage et se faire une idée plus précise de l'état du forage. Toutes ces inspections devraient être consignées en détail et les vidéos devraient être conservées à des fins de référence future.

Les caméras en circuit fermé permettent d'inspecter la totalité d'un forage, de haut en bas, en « temps réel ». Les vues latérales permettent d'observer l'état du tubage ou des crépines à des profondeurs précises, consignées. Avec des informations de cette qualité, il est possible de repérer les problèmes et de planifier la réhabilitation complète d'un forage. Les détails de la construction peuvent être observés directement et comparés avec le log de forage original s'il est accessible. Une caméra permet d'inspecter les objets et les débris tombés dans un trou et d'évaluer s'il est possible de les éliminer. Les cascades et, dans une certaine mesure, la qualité de l'eau (précipités chimiques, turbidité) peuvent être observées sur un écran de télévision.



Figure 19. Caméra en circuit fermé pour forage

Il existe aujourd'hui sur le marché des systèmes de caméra vidéo très sophistiqués. Conçus pour entrer facilement dans un forage, les meilleurs modèles sont entièrement submersibles et comprennent des câbles indiquant la profondeur, accompagnés d'un treuil à moteur ou manuel, ou un enregistrement automatique de la profondeur. De nombreux modèles ont une lampe intégrée, et permettent

le pivotement horizontal et l'inclinaison verticale sous différents angles, ce qui signifie qu'il est possible d'avoir une vue claire du fond et des côtés du forage. Les écrans sont généralement fournis avec la caméra ; un enregistreur vidéo peut être en option. La GeoVISION Deluxe (référence de produit 6, annexe 7) est un bon exemple de caméra d'inspection des forages.

Si l'eau d'un forage est très trouble, la rétrodiffusion du système d'éclairage risque de brouiller l'image. Néanmoins, ce type de système est un outil précieux lorsqu'un programme de réhabilitation est envisagé. Une fois qu'un forage est atteint par des problèmes d'incrustation ou de corrosion, il doit être réhabilité ou traité à l'aide de techniques mécaniques, chimiques, ou autres (comme celles utilisées pour le développement) afin qu'il retrouve sa capacité de production perdue, mais il n'existe pas de traitement adapté à chaque puits.

10.2.2 Dissolution des dépôts et des incrustations

Il est généralement difficile – sinon impossible – d'enlever les anciens tubages ou crépines pour les nettoyer ou les remplacer, alors il faut souvent utiliser d'autres méthodes.

Il est possible de nettoyer les crépines à l'aide d'une brosse métallique rotative ou d'un grattoir, mais comme elles peuvent avoir été fragilisées par la corrosion, il convient de prendre garde à ne pas aggraver leur état. Les méthodes de restauration des forages sont semblables à celles utilisées pour le développement, sauf que les incrustations doivent être dissoutes et éliminées.

A) *Nettoyage au jet*

S'il est fait systématiquement, le nettoyage par injection d'eau sous pression peut être un moyen particulièrement efficace de décolmater et de nettoyer les surfaces internes des forages. Il faut pour cela une buse fixée à l'extrémité d'un tuyau pour eau sous pression en caoutchouc ou en métal. Des essais ont montré qu'une buse avec une pression

Cependant, dans les pays tropicaux, par exemple, lorsqu'une caméra relativement chaude est introduite dans l'eau froide d'un forage, de la condensation peut se former sur la surface intérieure de la lentille, ce qui obscurcit la vision.

De plus, à moins que le forage en question soit d'un diamètre relativement large (par ex. 25 cm ou plus) et ne contienne pas de crépines, il n'est pas conseillé – en raison du risque de causer des dommages accidentels – d'y introduire des tiges de forage à l'aide d'une foreuse amenée sur le site.

à la sortie de 17 000 kPa (pour une buse de 3,5 à 5 cm, située à environ 2,5 cm de la crépine) sera efficace dans la plupart des cas. Dans les forages sans cuvelage, la pression maximale est d'environ 40 000 kPa. Pour éviter de causer des dommages aux crépines en plastique, les pressions supérieures à 20 000 kPa devraient être évitées, car l'injection d'eau sous haute pression (plus de 30 000 kPa) risque de fendre le tubage en plastique. Le tubage en acier peut supporter une pression allant au moins jusqu'à 55 000 kPa et les crépines qui répondent le mieux à ce traitement sont celles ayant un coefficient d'ouverture élevé et des fentes continues, comme les crépines à fil profilé en V enroulé en spirale, notamment les crépines Johnson.

B) Technique air burst

La technique *air burst* est une méthode récente et brevetée de réhabilitation des forages. Elle consiste à utiliser de petits volumes de gaz inerte pour générer des « pulsations de pression » à haute intensité dans certaines zones à l'intérieur d'un puits.

Les pulsations, provoquées à l'aide d'un outil spécial, créent des bulles d'air et des chocs acoustiques à haute fréquence, qui pulvérisent les incrustations et les dépôts minéraux et organiques sur les parois et les crépines du forage. Les bulles de gaz provoquent un va-et-vient de l'eau qui entre et sort de la formation adjacente à l'outil, déplaçant les sédiments, les débris d'incrustations et les fragments de biofilm, qui sont évacués dans le forage et peuvent ensuite être nettoyés par la technique classique de l'*air lift*.

La technique *air burst* peut permettre de développer chaque partie de la structure du forage avec des jets multiples et ajustables, qui peuvent être adaptés au diamètre, au type ou à l'âge du forage. Cependant, c'est une technique spécialisée probablement mieux adaptée aux forages à haut rendement gravement détériorés dans les champs de captage utilisés à des fins de production commerciale ou dépendant des services publics.

C) Acidification

Pour les forages très endommagés, la solution la plus efficace sera sans doute une combinaison des méthodes physiques et chimiques. L'acidification (mentionnée à la section 6.2.1B) peut éliminer les incrustations de carbonate et les dépôts d'hydroxyde de fer lorsqu'ils ne sont pas encore cimentés.

Les dépôts de fer durcis devront être dissous à l'aide des méthodes physiques décrites ci-dessus. Une solution d'acide sulfamique à 30 % par rapport au volume de la section crépinée ou ouverte à nettoyer peut être utilisée pendant 15 à 24 heures en agitant périodiquement l'eau du forage en y injectant de l'air.

D) Fracturation hydraulique

Les vieux forages réalisés dans des formations à faible débit, comme les roches cristallines précambriennes, peuvent être stimulés par un processus appelé «fracturation hydraulique».

Cette technique ne peut s'appliquer qu'à des sections ouvertes sans tubage, par exemple vers le fond d'un trou. Tout d'abord, il faut procéder à un examen à l'aide d'une caméra en circuit fermé ou à une diagraphie géophysique du forage afin d'évaluer s'il est adapté à ce traitement. La section à travailler devrait déjà être fracturée dans une certaine mesure et doit être isolée à l'aide d'un *packer* quelconque, par exemple une série de joints d'étanchéité en caoutchouc qui peuvent être introduits dans le forage à l'aide d'un bélier hydraulique ou d'air comprimé depuis la surface.

Un tuyau d'injection est abaissé au centre du système d'étanchéité, puis de l'eau sous pression est injectée dans le forage afin de créer ou d'élargir les fractures. Il est possible d'ajouter du sable à l'eau afin de maintenir ouvertes («étayer») les nouvelles fractures créées.

Des rapports indiquent que des augmentations de débit de 20 à 80 % ont été obtenues grâce à cette méthode. En

fonction de la nature de la formation, des pressions de 35 bars (douce) à 140 bars (dure) sont utilisées. Après le traitement, l'eau et les débris sont ramenés à la surface par la méthode normale de l'*air lift*.

10.2.3 Retubage

Un forage très corrodé – et dont sortent des sédiments – ne peut être réhabilité que par un retubage partiel ou total. La méthode requise ne peut être déterminée qu'après avoir procédé à une inspection du forage à l'aide d'une caméra ou d'une diagraphie géophysique afin de déterminer l'ampleur des dommages ou de la détérioration. Les diagraphies des forages peuvent fournir des indications (température de l'eau, conductivité, débit, résistivité ou état des collerettes; voir section 6.3.3) sur la présence éventuelle de trous dans le tubage.

Tous les nouveaux tubes ou crépines installés doivent être faits de matériaux résistants à la corrosion afin d'éviter que le problème ne ressurgisse. Le diamètre du nouveau tubage sera plus petit, et la nouvelle pompe devra être choisie avec ce fait à l'esprit.

Les crépines corrodées ne devraient si possible pas être doublées, car la présence de crépines en cercles concentriques crée des turbulences et provoque de l'abrasion. De plus, les fragments de métal corrodé pourraient être aspirés dans le forage durant le pompage.

Bien que cela puisse être extrêmement difficile, il faudrait enlever les crépines corrodées et les remplacer par de nouveaux matériaux résistant à la corrosion. Pour cela, il faudra amener une grosse foreuse sur le site et utiliser sa puissance pour retirer l'ancienne colonne de tubage.

Tout massif filtrant perdu peut être soufflé à l'extérieur. Une fois les nouveaux tubes installés, le forage peut être développé de la façon habituelle.

Deux sets de crépines en cercles concentriques réduiraient considérablement le rendement d'un forage, mais s'il est prévu d'installer une pompe à main, cela n'a pas une grande importance.

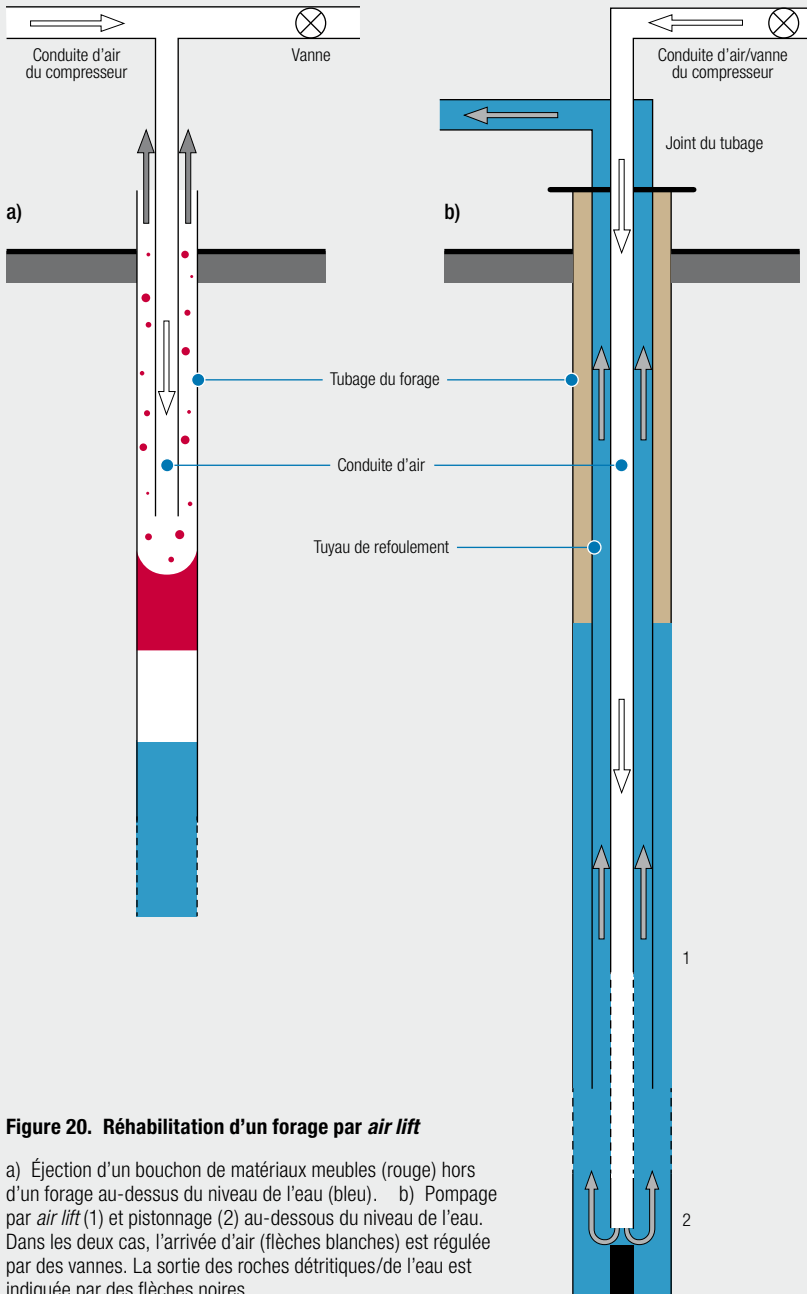


Figure 20. Réhabilitation d'un forage par air lift

a) Éjection d'un bouchon de matériaux meubles (rouge) hors d'un forage au-dessus du niveau de l'eau (bleu). b) Pompage par air lift (1) et pistonnage (2) au-dessous du niveau de l'eau. Dans les deux cas, l'arrivée d'air (flèches blanches) est régulée par des vannes. La sortie des roches détritiques/de l'eau est indiquée par des flèches noires.

Les nouveaux tubes et crépines peuvent être protégés contre la corrosion à l'aide d'électrodes sacrificielles (protection cathodique). Des anodes sacrificielles d'un métal qui est situé « au-dessus » de l'acier dans la série électrochimique (tendance relative à l'oxydation) – comme le magnésium et le zinc – sont installées et se corrodent à la place du métal du tubage, qui est ainsi protégé. Ces systèmes sont utilisés pour protéger les bateaux, les pipelines sous-marins et les installations de pompage mais sont rarement appliqués aux tubes ou aux crépines des forages.

Les techniques d'élimination des dépôts et des incrustations qui colmatent les orifices comprennent le pistonnage sous pression, l'injection d'eau sous pression, le pompage par *air lift*, la technique *air burst*, et la dispersion à l'aide de produits chimiques. Une réhabilitation régulière peut permettre d'éliminer les dépôts avant qu'ils ne durcissent.

Les méthodes typiques comprennent notamment l'utilisation d'un compresseur monté sur camion ou sur remorque, semblable à ceux normalement utilisés durant le forage (capacité minimale 7 bars/100 psis). La figure 20 présente les installations de pompage par *air lift* les plus couramment utilisées. Ces schémas montrent quelles options sont à disposition pour enlever un bouchon peu profond et meuble au-dessus du niveau de l'eau avec le tubage ouvert (a), et pour le nettoyage par *air lift* en dessous du niveau de l'eau à l'aide d'un tuyau de refoulement à l'intérieur d'un tubage fermé (b, 1). Pour l'injection d'air et le pistonnage, la conduite d'air est abaissée de façon à ce que son extrémité se trouve en dessous de l'orifice inférieur du tuyau de refoulement (b, 2). L'injection d'air/le pistonnage et le nettoyage devraient être effectués en alternance et chaque processus répété cinq à six fois, ou jusqu'à ce que l'eau du forage soit propre.

En plus de l'injection d'air, il est possible d'utiliser une foreuse pour redimensionner un forage sans tubage ou dont le tubage a été retiré. Un forage peut être alésé ou approfondi

pour couper une plus grande partie de l'aquifère ou pour fournir un rabattement plus grand. Les puits ordinaires peu profonds peuvent aussi être réhabilités à l'aide d'une foreuse. Quand le niveau de l'eau descend sous le fond d'un puits, le puits est asséché. Si l'intégrité de la structure du puits (ses parois et sa structure de surface) est bonne, une foreuse peut être utilisée pour réaliser un forage à travers le fond du puits et dans l'aquifère peu profond (voire plus profondément, mais il peut être préférable de réaliser un forage entièrement nouveau si c'est le but). On peut introduire, si nécessaire, des tubes et des crépines à l'aide des méthodes décrites ci-dessus et installer une pompe à main sur la dalle du puits avec des tuyaux d'exhaure descendant dans le forage.

10.2.4 Stérilisation des forages

Les forages touchés par des incrustations de fer devraient être stérilisés par chloration entre le nettoyage et l'essai par paliers de débit, afin de détruire les ferrobactéries omniprésentes et de ralentir la réinfection du puits. Du HTH en granulés peut être dissous et ajouté de façon à laisser environ 50 milligrammes de chlore libre résiduel par litre dans l'eau du forage. Il est possible de mélanger la solution dans le forage en injectant de l'air avec la conduite utilisée pour le pompage par *air lift*. La concentration devrait être surveillée à l'aide d'un kit de contrôle de la qualité de l'eau comme le kit Oxfam-DelAgua. Le forage peut ensuite être soumis à des essais de pompage.

10.2.5 Essai de pompage par paliers de débit

Un essai de pompage par paliers de débit indiquera si la réhabilitation a réussi. Il peut aussi servir de nouveau point de référence pour mesurer le futur rendement du puits.

L'essai de pompage d'un forage réhabilité aidera aussi à rétablir l'écoulement normal des eaux souterraines et à éliminer les particules de limon restantes.

Durant un projet au Ghana (Nampusuor, 2001), la méthode de réhabilitation par *air lift* a été employée sur plusieurs forages équipés de pompes à main, qui faisaient tous moins de 50 mètres de profondeur. Le coût estimé du travail était de 800 à 1000 dollars américains par forage avec un entrepreneur (y compris un essai de pompage par paliers de débit) et le processus prenait environ 24 heures par trou. Les frais peuvent être réduits si une organisation effectue ces travaux elle-même.

10.2.6 Réparation mécanique

De nombreux forages sont désaffectés car les pompes sont en panne ou en raison d'un manque de compétences ou de pièces de rechange. Dans le cas des pompes à main, ce problème peut être relativement facile à résoudre: il suffit d'un set d'outils classiques pour démonter la poignée de la pompe, la chaîne, les tuyaux d'exhaure, les tiges et le piston, afin de les inspecter et de les réparer ou de les remplacer.

L'enlèvement des pompes et les tuyaux d'exhaure des forages plus profonds peut requérir un tripode et un véhicule équipé d'un treuil. Dans la mesure du possible, un forage devrait être inspecté par caméra vidéo après que la pompe a été retirée (voir ci-dessus).

Dans le sud du Darfour, l'auteur a mis en place – avec le CICR – une équipe mobile de réparation des pompes à main utilisant deux véhicules et deux mécaniciens (plus des assistants locaux dans chaque village). Cinq sets complets de pièces détachées de la pompe à main India Mark II, ainsi que de nouveaux tuyaux d'exhaure, de nouvelles tiges et de nouveaux outils étaient transportés dans une camionnette. L'équipe se déplaçait de village en village, localisant et réparant les pompes à main abandonnées sur les forages peu profonds.

11. COLLABORATION AVEC LES ENTREPRENEURS

Pour un projet d'approvisionnement en eau, les planificateurs doivent décider s'ils veulent faire appel à des entreprises de forage commerciales ou investir dans des machines et du personnel expérimenté (voir section 7.1).

S'ils concluent, après avoir effectué une analyse financière, qu'il faut engager un entrepreneur, il convient de prendre quelques précautions afin d'éviter les surprises.

Les entrepreneurs sont généralement – mais pas toujours – des professionnels très sérieux, mais ils représentent des entreprises commerciales qui ont leurs propres contraintes, tensions et attitudes face à la prise de risque. En en étant conscients, vous pourrez voir un projet de leur point de vue et anticiper certaines de leurs actions.

11.1 Choix d'une entreprise

Travailler avec des entreprises de forage peut être soit intéressant, soit frustrant. Comme les malentendus relatifs à ce qui est attendu de l'entrepreneur peuvent engendrer une grande frustration, il faudrait définir clairement et dès le départ les prescriptions techniques et les termes du contrat. Comme il se peut que plusieurs entreprises de forage soumettent des offres pour un projet, le personnel responsable de l'attribution des contrats devra prendre en considération plusieurs facteurs :

- L'entreprise de forage a-t-elle bonne réputation ?
- L'entreprise peut-elle fournir des informations sur un contrat semblable récemment mené à bien, ou des références de ses employeurs ?
- L'entreprise figure-t-elle sur une liste des entreprises de forage agréées ? Appartient-elle à une organisation professionnelle (comme la *British Drilling Association* au Royaume-Uni) ?
- L'entreprise possède-t-elle l'équipement nécessaire pour remplir les exigences du contrat et cet équipement est-il en bon état ? (Pour répondre à cette question, une visite

du dépôt du foreur avec un ingénieur expérimenté et impartial sera utile.)

- L'entreprise possède-t-elle des installations adéquates d'entretien et de réserve, et sont-elles suffisantes ?
- Le dépôt ou l'entrepôt de l'entreprise est-il propre et bien géré ? (Cela vous donnera une idée de la qualité de son travail.)
- Vérifiez le personnel employé par l'entreprise : est-il suffisamment expérimenté ou qualifié ?

11.2 Contrats

Les contrats de forage sont très semblables à d'autres accords commerciaux, par exemple dans le secteur du génie civil. Mais le forage est un domaine spécialisé qui requiert des objectifs techniques clairement définis et des méthodes qui devraient intégrer un certain degré de flexibilité.

L'annexe 5 présente un exemple de contrat de base entre un client et un entrepreneur. Le contrat devrait contenir des clauses spécifiques et des prescriptions techniques qui doivent être bien connues du responsable ou du représentant du client. Ces prescriptions détaillées devraient lui permettre d'arbitrer rapidement (mais pas toujours à l'amiable) tout différend professionnel et d'y mettre un terme.

Les fiches de travail/listes des prix destinées aux entreprises de forage devraient comprendre tout ce qui est nécessaire pour satisfaire aux clauses et aux prescriptions techniques du contrat. Elles figurent à l'annexe 6.

ANNEXES

Annexe 1. Exemple de log de forage

Annexe 2. Devis récents pour tubes et crépines

Annexe 3. Exemples de forages (pas à l'échelle):

- Annexe 3A: Construction d'un forage pour pompe à main dans un aquifère peu profond situé dans une zone altérée
- Annexe 3B: Construction d'un forage pour un aquifère gréseux partiellement consolidé (comme dans la figure 1, site hypothétique B)
- Annexe 3C: Construction d'un forage pour des aquifères gréseux et calcaires (comme dans la figure 1, site hypothétique C)
- Annexe 3D: Construction d'un forage pour un aquifère situé dans une zone de granite fracturé (comme dans la figure 1, site hypothétique D)

Annexe 4. Exemple de fiche de données d'un essai de pompage

Annexe 5. Contrat de forage de base: clauses et prescriptions

Annexe 6. Liste des points d'une fiche de travail/liste de prix destinée à un entrepreneur

Annexe 7. Références de produits et lectures approfondies

Annexe 2. Devis récents pour tubes et crépines

(Fournis par *BOODE UK Ltd* (puits d'eau))

1. Tubage et crépines PVC :

- a) Tubes et crépines PVC (4») 113 mm (De) × 103 mm (Di) × 2,9 m, joints d'aboutement de type C à filetage trapézoïdal
Tubage: GBP 23,11 par élément
Crépine: GBP 31,92 par élément

- b) Tubes et crépines PVC (6») 165 mm (De) × 155 mm (Di) × 2,5 m, joints de refoulement externe de type B à filetage trapézoïdal
Tubage: GBP 35,66 par élément
Crépine: GBP 47,90 par élément

- c) Tubes et crépines PVC (8») 225 mm (De) × 203 mm (Di) × 5 m, joints d'aboutement de type C à filetage trapézoïdal
Tubage: GBP 168,33 par élément
Crépine: GBP 204,92 par élément

- d) Tubes et crépines PVC (12») 315 mm (De) × 299 mm (Di) × 5 m, joints de refoulement externe de type B à filetage trapézoïdal
Tubage: GBP 200,95 par élément
Crépine: GBP 245,17 par élément

2. Tubage et crépines en acier inoxydable :

- a) Crépines Johnson (12") en acier inoxydable à fil enroulé 304 L, 323,9 mm (De) × 305,5 mm (Di) × 5 m, largeur de fente: 1 mm, résistance à l'écrasement: 9,3 bars, bague à souder et joints de tubage: GBP 1114,00 par élément

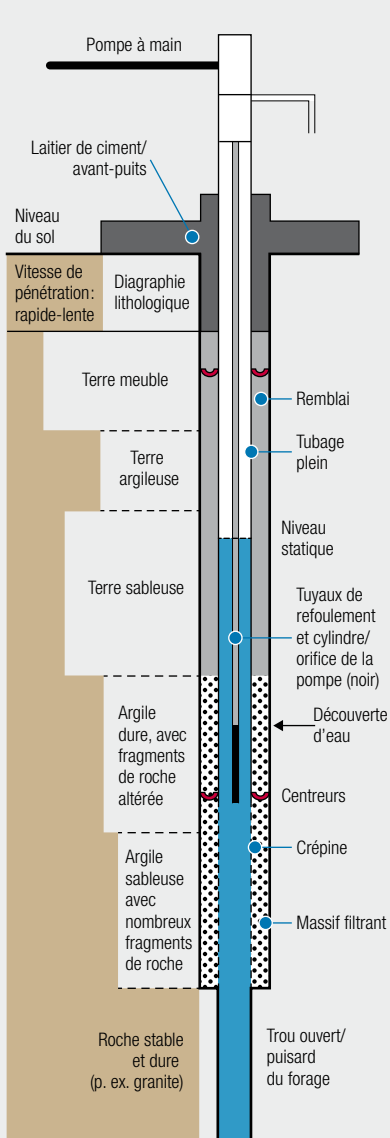
- b) Crépines Johnson (10") en acier inoxydable à fil enroulé 304 L, 273,1 mm (De) × 256 mm (Di) × 6 m, largeur de fente: 0,5 mm, résistance à l'écrasement: 17,4 bars, bague à souder et joints de tubage: GBP 1209,00 par élément

- c) Crépines Johnson (10"), 273,1 mm (De), épaisseur: 4,19 mm, 304 L, tubage en acier inoxydable: 3 m, raccords API mâle et femelle: GBP 1185,00 par élément

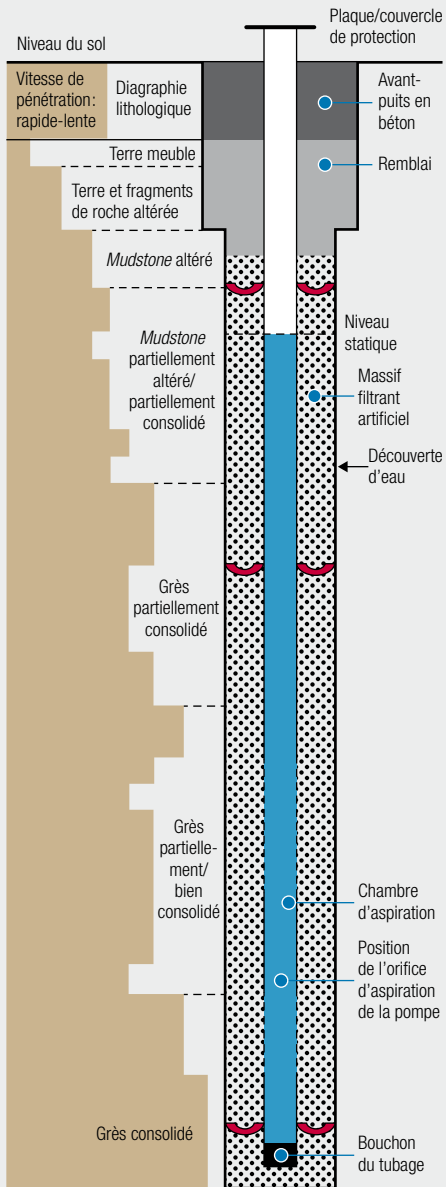
- d) Crépines Johnson (7 5/8") 193,7 mm (De), épaisseur 3 mm, 304 L, tubage en acier inoxydable: 6 m, collerettes à souder: GBP 822,00 par élément

Annexe 3. Exemples de forages (pas à l'échelle)

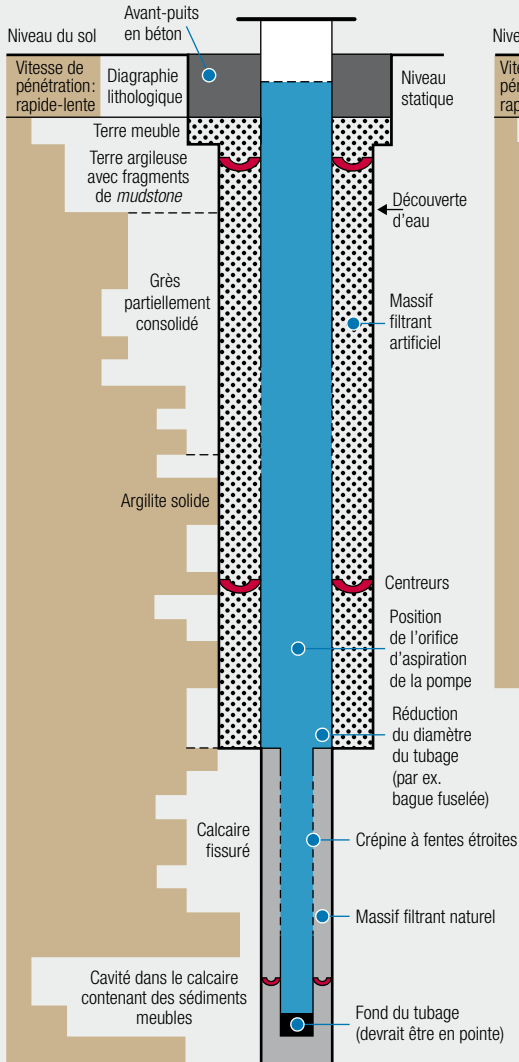
Annexe 3A: Construction d'un forage pour pompe à main dans un aquifère peu profond situé dans une zone altérée



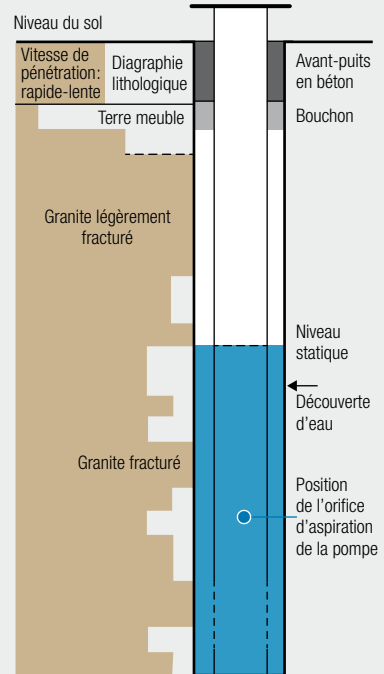
Annexe 3B: Construction d'un forage pour un aquifère gréseux partiellement consolidé (comme dans la figure 1, site hypothétique B)



Annexe 3C: Construction d'un forage pour des aquifères gréseux et calcaires (comme dans la figure 1, site hypothétique C)



Annexe 3D: Construction d'un forage pour un aquifère situé dans une zone de granite fracturé (comme dans la figure 1, site hypothétique D)



Annexe 4. Exemple de fiche de données d'un essai de pompage

[NOM DE L'ORGANISATION]		FICHE D'ESSAI DE POMPAGE PAR PALIERS DE DÉBIT							
[PROJET/CONTRAT]		ENTREPRENEUR:							
Forage n°:		Emplacement/coordonnées:			Altitude:				
Forage nouveau/réhabilité		Profondeur du forage:			Niveau statique:				
Pompe utilisée pour l'essai:		Profondeur de l'aspiration:			Données du test:				
Pompe existante:		Responsable de l'essai:			Date de l'essai:				
Durée du pompage (min.)	PHASE 1 (1 heure)		PHASE 2 (1 heure)		PHASE 3 (1 heure)		PHASE 4 (1 heure)		Remontée (Rabattement résiduel) (m)
	Rabattement (m)	Débit (unités)	Rabattement (m)	Débit (unités)	Rabattement (m)	Débit (unités)	Rabattement (m)	Débit (unités)	
0,5									
1									
1,5									
2									
2,5									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
12									
15									
20									
25									
30									
40									
50									
60									
70									
80									
90									
100									
120									
Remarques:									

Note :

Pour les mesures de l'essai de pompage à débit constant sur 24 heures, utiliser les mêmes temps de pompage que pour l'essai par paliers, plus : 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1440 minutes.

Pour les mesures de l'essai de pompage à débit constant sur 48 heures, utiliser les mêmes temps de pompage que pour l'essai par paliers, plus : 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2880 minutes.

Pour les mesures de la remontée (rabattement résiduel) après l'arrêt du pompage, utiliser les mêmes intervalles de temps, en continuant à faire des relevés toutes les 100 minutes après 2800, jusqu'à ce que le niveau soit remonté à 20 cm du niveau statique de départ.

Annexe 5. Contrat de forage de base : clauses et prescriptions

A. Clauses générales

A.1

Ce contrat a pour objet la construction de forages, dans le but de fournir un approvisionnement en eau potable pour les communautés (ou camps)

L'Entrepreneur procédera aux travaux de forage prévus et fournira les machines, l'équipement, les outils, les matériaux et la main-d'œuvre nécessaires pour construire et développer les forages comme il se doit et procéder aux essais de pompage requis. Il fournira en outre des tubes, des crépines et des massifs filtrants conformes aux exigences de qualité figurant ci-après.

A.2

Le Client fournira toutes les informations à sa disposition sur les conditions superficielles et hydrogéologiques de chaque site de forage. Ces informations n'engagent pas la responsabilité du Client en cas de variations locales des conditions sur des sites de forage spécifiques ou en cas de problèmes particuliers que l'Entrepreneur pourrait rencontrer au cours des travaux.

A.3

Le Client indiquera l'emplacement des sites de forage et fournira les permis nécessaires pour accéder au terrain où le contrat doit être rempli.

L'Entrepreneur sera responsable de tous les dommages causés hors du terrain alloué.

L'Entrepreneur nettoiera les débris de toute sorte et, une fois le forage terminé, développé et testé, laissera le terrain, dans la mesure du possible, dans son état d'origine.

A.4

Si l'Entrepreneur ne peut pas mener à bien le forage ou doit l'abandonner en raison de la perte d'outils ou de tout autre incident ou imprévu, il devrait retirer le tubage ou les tubes guides déjà placés dans le trou et le remblayer à l'aide d'argile ou de béton, à ses frais. Tous les matériaux extraits de ces trous, après leur remblayage, seront la propriété de l'Entrepreneur. Dans ce cas, le Client ne payera pas le travail effectué et autorisera à l'avance la réalisation d'un nouveau forage, sur un site proche de celui qui a été abandonné.

B. Prescriptions techniques

B.1 Forages

B.1.1 Informations sur chaque forage

L'Entrepreneur fournira un log de forage détaillé, où figureront avec précision toutes les informations pertinentes sur la vitesse de forage, le tubage et autres opérations de construction.

L'Entrepreneur notera en outre toutes les informations relatives à l'apparence de l'eau trouvée et aux aquifères, aux types de strates rencontrées et aux échantillons de formation.

B.1.2 Tubage et diamètres

La réalisation de chaque forage sera conduite conformément à ces prescriptions, à l'aide des outils de forage, des tubes guides, du tubage, des massifs filtrants et des dispositifs de protection sanitaire adéquats, en fonction des caractéristiques réelles de la ou des formations aquifères. Le tubage et la protection sanitaire (avant-puits) devraient isoler les aquifères d'autres formations jugées impropres à la production d'eau potable.

Le dimensionnement du forage doit être autorisé par le Client (ou le représentant du Client sur place) avant l'installation du tubage et des crépines dans le puits.

B.1.3 Tubes, crépines et massifs filtrants artificiels

L'Entrepreneur fournira tous les tubes, crépines et équipements nécessaires au tubage adéquat des puits au prix convenu.

Un massif filtrant artificiel de bonne qualité sera placé dans l'espace annulaire entre la paroi du forage et le côté extérieur du tubage/de la crépine. Les techniques appropriées devraient être utilisées pour mettre ce massif en place avec précision. Le gravier utilisé devrait être propre et bien arrondi. Les gravillons devraient être durs et d'origine alluviale, et mesurer entre 0,5 et 2,5 centimètres de diamètres. Ce gravier sera soumis à l'approbation du Client.

B.1.4 Matériel de forage et profondeur du forage

L'Entrepreneur utilisera du matériel permettant d'atteindre la profondeur requise. Il peut employer des outils de forage au câble, des foreuses rotary ou des marteaux fond de trou. Toutes les profondeurs indiquées à l'Entrepreneur avant le forage devraient être considérées provisoires et ne lui sont communiquées qu'à titre d'information.

Si les caractéristiques effectives des forages à réaliser justifient une modification de ces prescriptions, l'Entrepreneur demandera l'autorisation du Client avant de procéder à ces changements. Ces échanges seront faits par oral et seront dûment consignés par le Client.

Une fois que le Client aura autorisé les changements de profondeur du forage, le prix sera ajusté en fonction de la profondeur finale du forage et du prix à l'unité fourni par l'Entrepreneur dans sa proposition initiale.

B.2 Finitions du forage et essais de pompage

B.2.1 Essais de pompage

Une fois la construction du forage terminée, le puits sera développé à l'aide d'additifs adéquats pour disperser la boue (si nécessaire) et de la technique du pistonnage hydraulique (en utilisant un piston/bloc de pistonnage ou de l'air comprimé). Immédiatement après la fin de ces opérations, et une fois que l'eau du forage est certifiée propre par le Client, l'unité de pompage peut être introduite dans le puits.

L'Entrepreneur fournira une installation d'essai de pompage pouvant assurer un débit d'eau de 50 % supérieur au débit maximal indiqué pour chaque forage.

L'Entrepreneur communiquera (... jours à l'avance) la date de l'essai de pompage, qui doit être mené conformément au point B.2.1.1.

B.2.1.1 L'essai de pompage

L'essai consistera à pomper de façon continue le forage au débit maximal convenu par l'Entrepreneur et le Client (ou à tout autre débit préalablement défini, en fonction des résultats des travaux de forage). La durée de cet essai sera de ... heures. Des mesures du niveau dynamique de l'eau seront effectuées aux intervalles de temps définis par l'échelle logarithmique normalement utilisée pendant les essais de pompage.

B.2.1.2 Autres prescriptions

L'Entrepreneur évacuera toute l'eau pompée de façon à ce qu'il ne se crée aucune mare à la surface à moins de 100 mètres du forage. L'Entrepreneur fournira tout le matériel nécessaire pour l'éviter.

L'Entrepreneur fournira tout l'équipement nécessaire (déversoirs, tuyaux ou appareils de mesure) permettant de mesurer de façon adéquate les débits et les niveaux d'eau.

B.2.2 Débit du forage

Une fois les essais de pompage effectués, le Client définira le débit de production recommandé pour chaque forage en fonction des résultats des essais de pompage, des techniques hydrogéologiques appropriées et des besoins effectifs.

B.3 Verticalité et alignement du forage

B.3.1 Tests

La verticalité et l'alignement du forage seront vérifiés à l'aide d'une tige ou d'un tuyau d'acier de 12 mètres de long parfaitement droit, qui sera introduit jusqu'au fond du puits. Le diamètre externe de ce tuyau mesurera au plus 13 millimètres de moins que le diamètre intérieur du tubage du puits. Il sera fourni par l'Entrepreneur.

B.3.2 Prescriptions minimales

L'objet utilisé pour le test décrit au point B.3.1 devrait passer facilement dans tout le forage, ou dans la principale section du tubage qui contiendra la pompe et la conduite de refoulement. La perte de verticalité de l'axe du puits ne devrait jamais représenter plus des deux tiers du diamètre intérieur du tubage. Si ces exigences minimales ne sont pas satisfaites, l'Entrepreneur corrigera les défauts s'il le peut. Sinon, le Client est en droit de refuser le puits et ne fera aucun paiement pour son forage et les finitions. Ce contrôle peut être effectué avant ou après les essais de pompage.

B.4 Protection de la qualité de l'eau, désinfection et échantillonnage

B.4.1 Responsabilité de l'Entrepreneur

L'Entrepreneur prendra le plus grand soin à éviter toute contamination physique, chimique ou bactérienne de l'eau du puits durant le processus de construction. Si l'eau est polluée en raison d'une négligence de l'Entrepreneur, celui-ci devra prendre toutes les mesures correctrices nécessaires à ses frais, afin d'éliminer cette pollution.

B.4.2 Stérilisation du puits

Une fois le forage terminé et les tests effectués, l'Entrepreneur désinfectera le puits à l'aide d'une solution chlorée d'au moins 50 milligrammes/litre de chlore actif dans toutes les parties du puits.

La solution chlorée utilisée peut être préparée en dissolvant de l'hypochlorite de calcium, de l'hypochlorite de sodium ou du chlore gazeux dans l'eau. Cette solution devrait rester dans le puits pendant au moins quatre heures à la concentration précisée.

B.4.3 Échantillons de formation

L'Entrepreneur conservera un registre complet des échantillons de formation collectés durant les opérations de forage. Il placera les échantillons dans des sacs correctement fermés et étiquetés, et les mettra à la disposition du Client si celui-ci le demande.

L'Entrepreneur recueillera au moins un échantillon tous les trois mètres de forage, à moins que le foreur observe un changement dans les formations géologiques. Dans ce cas,

d'autres échantillons devraient être recueillis. Chaque échantillon devrait peser au moins 500 grammes.

Pour chaque échantillon qu'il ne collecte pas, l'Entrepreneur sera pénalisé d'une amende s'élevant à 1 % de la valeur totale du forage, et qui sera déduite du paiement final. Si le nombre total d'échantillons manquants représente plus de 15 % du nombre prévu, l'Entrepreneur devra recommencer le forage et le Client ne paiera pas le travail déjà effectué.

B.4.4 Échantillons d'eau

L'Entrepreneur recueillera deux échantillons d'eau en vue d'une analyse en laboratoire après la fin de l'essai de pompage de longue durée (à débit constant). Un échantillon servira à faire une analyse physique et chimique et devrait être placé dans un conteneur de plastique ou de verre propre et bien scellé. Son volume ne devrait pas être inférieur à cinq litres. Le second échantillon sera utilisé pour effectuer une analyse bactériologique. Il devrait être recueilli en trois exemplaires, dans des conteneurs stérilisés, bien scellés et protégés. Le volume de ces conteneurs ne devrait pas être inférieur à 100 millilitres. Ces échantillons seront remis au Client dès qu'ils auront été recueillis.

B.4.5 Particules de sable présentes dans l'eau

L'eau puisée dans le forage sera acceptable si sa teneur en particules de sable est inférieure à trois grammes par mètre cube. Si cette limite est dépassée, l'Entrepreneur procédera à ses frais à tous les ajustements nécessaires pour satisfaire à cette exigence.

B.5 Finitions

B.5.1 Couvercle provisoire

L'Entrepreneur prendra bien soin à protéger le forage contre l'entrée d'eau ou d'autres polluants durant et après le forage. À cette fin, il fournira un couvercle ou bouchon provisoire qui sera placé sur le tubage à chaque fois que la foreuse n'est pas en fonctionnement. Ce couvercle sera aussi placé une fois le forage terminé.

B.5.2 Avant-puits

Tous les forages terminés et testés devraient être équipés d'un avant-puits adéquat en béton.

Cette protection sera placée au moins deux mètres sous le niveau du sol et ne dépassera pas du sol de plus 0,25 mètre. Elle occupera l'espace annulaire entre la paroi du forage et l'extérieur du tubage/de la crépine.

Annexe 6. Liste des points d'une fiche de travail/ liste de prix destinée à l'entrepreneur

Entreprise de forage	
Déplacement jusqu'au site	km
Installation	par installation
Réalisation des fosses à boue	heures
Boue de forage	kg de boue
Forage au diamètre X"	m
Forage au diamètre Y"	m
Forage au diamètre Z"	m
Fabrication de la pointe du tubage	par fabrication
Forage avec agent moussant	kg d'agent
Installation de tubage/crépines/centreurs	m
Fabrication de bagues de réduction	par fabrication
Installation du massif filtrant	kg, sac ou mètre cube
Remblayage	par processus
Ajout de chlore/Calgon	kg de chlore/Calgon
Acidification	par procédé
Développement (injection d'air/pistonnage/injection d'eau)	heures
Nettoyage mécanique	heures
Avant-puits	heures
Couvercle du forage	par pièce
Échantillonnage de la formation	par collecte
Échantillons d'eau	par échantillon
Temps d'attente (pour l'entrepreneur)	pas de frais
Temps d'attente (pour le client)	heures
Immobilisation (pour l'entrepreneur)	pas de frais
Récupération d'objets (pour l'entrepreneur)	pas de frais
Contrôle de la verticalité/l'alignement	par contrôle
Nettoyage du site (pour l'entrepreneur)	pas de frais

Entrepreneur chargé des essais de pompage	
Déplacement jusqu'au site	km
Installation	par installation
Installation/retrait des pompes et de la conduite de refoulement (y compris tuyau d'exhaure)	m
Pompage, test par paliers/mesure du rabattement	heures
Remontée après test par paliers/mesure du rabattement	heures
Essai de pompage à débit constant/mesure du rabattement	heures
Remontée après l'essai de pompage à débit constant/mesure du rabattement	heures
Échantillons d'eau	par échantillon
Temps d'attente (pour l'entrepreneur)	pas de frais
Temps d'attente (pour le client)	heures
Immobilisation (pour l'entrepreneur)	pas de frais
Désinfection	par procédé
Nettoyage du site (pour l'entrepreneur)	pas de frais

Annexe 7. Références de produits et lectures approfondies

Références de produits

1. Consallen Group Sales Ltd., P.O. Box 2993, Sudbury, Suffolk CO10 0ZB, Royaume-Uni. Tél./fax: +44 (0) 1787-247770; courriel: sales@consallen.com
2. Eureka UK Ltd., 11, The Quadrant, Hassocks, West Sussex, BN6 8BP, Royaume-Uni. Tél.: +44 (0) 273 846333, fax: +44 (0) 273 846332
3. Promotion of Appropriate Technology Co. Ltd., 44/5 Soi Atit, Wutakard Road, Chomthong, Bangkok 10150, Thaïlande. Tél.: +66 (0) 2 476-1845, (0) 2 476-5313, fax: +66 (0) 476-5316; courriel: pat@pat-drill.com.
4. Viscosimètre (entonnoir de Marsh) : OFI Testing Equipment, Inc., 1006, West 34th Street, Houston, Texas, 77018, États-Unis. Tél.: 713 880 9885, 877 837 8683, fax: 713 880 9886, www.ofite.com
5. Johnson Screens (Inde) Ltd., courriel: sales@johnsonscreensindia.com
6. Marks Products Inc., 1243 Burnsville Road, Williamsville, Virginia, 24487-9611, États-Unis. Tél.: 800-255-1353, www.geovision.org

Lectures approfondies

1. Allen, D.V., *Low-Cost Hand Drilling*, Consallen Group Sales Ltd., Loughton, 1993.
2. Ball, P., *Drilled Wells*, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management (SKAT), 2001.
3. Clark, L., «The Analysis and Planning of Step Drawdown Tests», *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 10, p. 125-143, 1977.

4. Clark, L., *The Field Guide to Water Wells and Boreholes*, Geological Society of London Professional Handbook Series, 1988, Open University Press, Halsted Press (Milton Keynes, New York).
5. Driscoll, F. G., *Groundwater and Wells*, Johnson Division, St. Paul, Minn., 1986.
6. Howsam, P. (dir.), *Water wells: Monitoring, Maintenance, Rehabilitation*, Taylor & Francis, 1990.
7. Mthunzi, M., « Integrated Development for Water Supply and Sanitation: Introduction of Low Cost Boreholes », 25th WEDC Conference, Addis Abeba, Éthiopie, 1999.
8. Mulder, C. W. B. et Sloots, R. R., « The Overburdened Aquifer and its Potential Contribution to Reaching Targets for Safe Water Supply Coverage in Northern Uganda », *Groundwater & Climate in Africa (Kampala)*, 24-26 juin 2008.
9. Nampusuor, R., *Report on Innovations in Borehole Rehabilitation*, Report for the CWSA/CIDA Community Water Project Upper Regions, Ghana, 2001.
10. Roscoe Moss Company, *Handbook of Ground Water Development*, Wiley-IEEE, 1990.
11. Howsam, P., Misstear, B. et Jones, C., *Monitoring, Maintenance and Rehabilitation of Water Supply Boreholes*, CIRIA Publication R137, 1995.

INDEX

A

acides humiques 97
 additifs 30, 45, 46, 47, 49, 52, 74, 130
 affaissement 53
 air lift 76, 77, 105, 108, 110, 111, 112
 alcalinité 97
 alésage 43
 ammoniac 97
 anodes 112
 aquifère 9, 10, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 32, 44, 48, 49, 56, 60, 62, 63, 65, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 80, 81, 98, 102, 120
 aquifère captif 22
 artésien 9

B

bactéries 47, 75, 97, 98
 battage 29, 32, 35, 45, 78
 bentonite 46, 47, 75, 79, 105
 bicarbonates 97
 biodégradable 46
 blocs rocheux 30, 42, 62, 71
 boue 14, 31, 32, 35, 36, 38, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 56, 57, 67, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 130, 133

C

calcaire 19, 21, 22, 39, 72, 75
 calcaires 75, 120
 capacité de stockage 19, 24, 80
 carbonates 97
 chimique 75, 97, 101, 131, 132
 chlore 75, 86, 131, 133
 circulation 29, 32, 36, 47, 50, 52
 coefficient d'emmagasinement 19
 compresseur 35, 36, 49, 53, 54, 76, 77, 78, 112
 consultant 90, 92
 contamination 20, 24, 52, 79, 104, 131
 corrosion 62, 96, 98, 100, 101, 107, 110, 112
 crépine 23, 50, 63, 64, 65, 67, 68, 69, 71, 72, 76, 77, 85, 97, 108, 129, 132

D

débit de purge 76, 77, 78, 80, 81, 83, 84, 85

débit spécifique 60, 98
 déblais 29, 37, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 53, 54, 56, 79
 dioxyde de carbone 97, 98

E

échantillons 50, 51, 55, 56, 65, 72, 87, 100, 105, 121, 129, 131, 132
 effondrement 23
 Eh 97
 électrochimique 98, 112
 électrodes 87, 112
 espace annulaire 49, 50, 65, 66, 67, 71, 76, 79, 129, 132

F

ferreux 97
 ferrique 97
 fluide 36, 43, 47, 48, 49, 51, 52, 53
 formation 9, 10, 18, 21, 29, 32, 38, 44, 45, 46, 47, 53, 54, 55, 62, 65, 67, 68, 69, 73, 78, 87, 91, 108, 110, 129, 131, 133

G

géophysique 20, 87, 93, 109, 110
 gomme de guar 46, 47, 75

H

hydroxydes 97
 hygroscopique 75

I

incrustation 63, 71, 97, 98, 100, 101, 107

L

limon 97, 105

M

massif filtrant 42, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 73, 74, 76, 77, 79, 90, 98, 101, 110, 121, 129, 133
 méthane 97
 MFT 30, 32, 37, 38, 39, 53
 mousse 49, 52

O

organique 97

P

perméabilité 11, 19, 56, 80
 pertes 48, 63, 102
 pH 69, 97
 physique 101, 104, 131, 132
 pistonnage 76, 77, 78, 79, 101, 105, 111, 112, 130, 133
 pollution 21, 32, 52, 75, 98, 101, 131
 polymère 46, 47, 49
 pompe à main 24, 44, 60, 80, 86, 102, 110, 114, 120
 porosité 19, 22, 56, 69
 précipitation 66, 97
 puisard 49, 68
 puits ordinaire 23, 24, 28, 29, 80, 91

R

rabattement 44, 60, 61, 71, 72, 73, 81, 84, 85, 96, 97, 102, 127, 134
 rabattement dynamique 71
 recharge 18, 22, 60
 redox 97

S

schiste argileux 11, 30
 SDT 102
 socle 23, 44
 substances organiques 97
 sulfates 97

T

transmissivité 19, 21, 73, 80
 trépied 30
 trou ouvert 68, 69, 72, 78
 tubage provisoire 32, 60
 tube guide 44, 54, 55, 60, 79
 turbidité 74, 106
 turbulences 110

V

verticalité 85, 131
 viscosité 46, 47, 48, 49, 56
 vitesse 11, 19, 37, 39, 44, 51, 53, 54, 55, 56, 63, 68, 69, 71, 81, 83, 97, 98, 129
 vitesse de pénétration 37, 44, 55, 68

Z

zones côtières 101

MISSION

Organisation impartiale, neutre et indépendante, le Comité international de la Croix-Rouge (CICR) a la mission exclusivement humanitaire de protéger la vie et la dignité des victimes de conflits armés et d'autres situations de violence, et de leur porter assistance. Le CICR s'efforce également de prévenir la souffrance par la promotion et le renforcement du droit et des principes humanitaires universels. Créé en 1863, le CICR est à l'origine des Conventions de Genève et du Mouvement international de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge, dont il dirige et coordonne les activités internationales dans les conflits armés et les autres situations de violence.



CICR