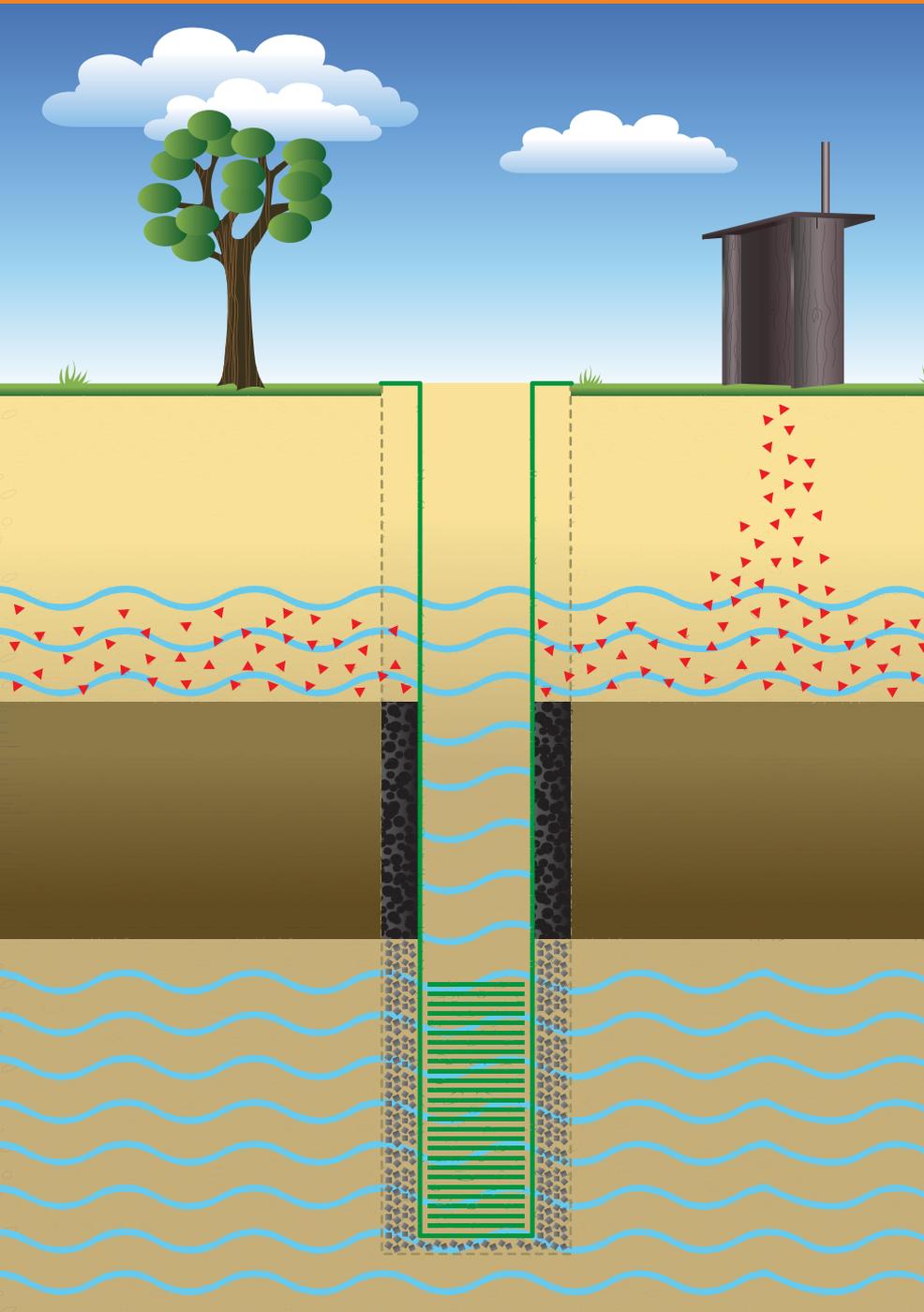


CONNAISSANCES DES METHODES DE CAPTAGE DES EAUX SOUTERRAINES

appliquées aux forages manuels



UN MANUEL
D'INSTRUCTION

pour les équipes de
forage manuel
sur l'hydrogéologie
appliquée,
l'équipement et le
développement des
forages

CONNAISSANCES DES METHODES DE CAPTAGE DES EAUX SOUTERRAINES

souterraines aux forages manuels

Un manuel d'instruction pour les équipes
de forage manuel sur l'hydrogéologie appliquée,
l'équipement et le développement des forages

Publié par la Fondation PRACTICA

Auteur – Arjen van der Wal

Relecture – Richard C. Carter

Appui pédagogique – Wouter Jan Fellingma, Melanie Stallen

Traduction Française – Julien Labas, Stéphan Abric, Régis Garandeau

Traduction Swahili – Walter Mgina, Ester Mgina-van Vugt

Illustrations – Franck Nederstigt

Photographies – Arjen van der Wal

Edition – Marijke Kreikamp/4colour design

Première édition – Avril 2008

Seconde édition – Juin 2010

La Fondation PRACTICA développe et diffuse des technologies à faible coût dans le secteur de l'eau et des énergies dans les pays en développement. L'accent est mis sur ; l'adaptation des technologies au contexte socio-économique des bénéficiaires, leurs potentiels de fabrication et de maintenance locale et leur distribution à travers les systèmes existants.

Fondation PRACTICA
Oosteind 47 - NL-3356 AB Papendrecht - Pays Bas
(t) +31 (0)786150125
info@practicafoundation.nl
www.practicafoundation.nl

Note de l'auteur et clause de non responsabilité

Ce manuel est gratuit. L'ensemble de ce manuel, y compris les illustrations et les dessins techniques, peuvent être copiés sans la permission de l'auteur ou de l'éditeur à condition qu'il soit distribué gratuitement et que la référence à la source soit mentionnée. L'auteur apprécierait d'être informé et de recevoir une copie de tous les documents réalisés à partir du texte d'origine ou des illustrations du présent manuel. Pour toute reproduction à des fins commerciales, une autorisation écrite doit être sollicitée préalablement auprès de la Fondation PRACTICA.

Ce manuel est disponible en anglais, français et Swahili et a été développé pour une utilisation pendant les sessions de formation technique des utilisateurs. Dans le cas où vous souhaiteriez organiser ce type de formation, vous pouvez contacter la Fondation PRACTICA pour plus d'informations et de conseils.

La première édition de cette publication a été rendue possible grâce au soutien financier du Programme de Formation Technique de la Fondation ETC aux Pays Bas et du Fonds des Nations Unies pour l'Enfance – UNICEF – bureau du Tchad. Une mise à jour de cette publication (seconde édition) a été rendue possible grâce au soutien financier de l'Agence des États-Unis pour le Développement International (USAID) dans le cadre de l'Initiative Ouest Africaine de l'Eau (WAWI).

Le Fond des Nations Unies Pour l'Enfance (UNICEF), La Fondation PRACTICA et Enterprise Works/Vita ont développé une mallette pédagogique pour les pays africains qui souhaitent se lancer sur la professionnalisation du forage manuel. Cette mallette pédagogique comprend des Fiches et Manuels Techniques, des documents de Plaidoyer, la Cartographie des zones appropriées pour le forage manuel, des Etudes de Cas, et des Manuels de Formation et de Mise en Œuvre. Cette initiative contribue à renforcer les capacités du secteur privé local afin de répondre à la demande croissante en eau potable dans les zones rurales.

La Fondation ETC, à travers son Programme de Formation Technique, a apporté son savoir-faire sur la conception des aspects pédagogiques de ce manuel.

Bien que toutes les précautions aient été prises pour assurer l'exactitude des renseignements fournis dans ce manuel, ni l'éditeur, ni l'auteur ne peuvent être tenus responsables des éventuels dommages occasionnés par l'application des méthodes décrites. Toute responsabilité à cet égard est exclue.

Remarque pour ceux qui souhaitent traduire ou modifier ce document; merci de contacter la Fondation PRACTICA avant de commencer toute traduction ou modification de ce manuel afin d'éviter toute duplication de travail et erreurs fortuites. Ce document ou partie de ce document ne peut pas être copié ou publié sous un nouveau nom ou auteur sans la permission de la Fondation PRACTICA.

Avant propos

Contexte

Au fil des années, de nombreux ouvrages traitant de la géologie, de l'hydrogéologie et des aspects sanitaires (hygiène) des forages ont été écrits dans de nombreux pays, ces informations sont utilisées par les décideurs politiques, les responsables de projets, les ingénieurs et techniciens pour réaliser des forages mécanisés.

Dans les pays en développement, les forages réalisés mécaniquement sont souvent très chers et inaccessibles à une large proportion de la population. Une alternative est de forer manuellement des forages 'peu profonds' (jusqu'à environ 35 mètres de profondeur), 4 à 10 fois moins chers que des forages mécanisés. La réduction du coût permet aux ONG et aux Gouvernements de construire plus de forages, mais offre également la possibilité aux villageois, agriculteurs, écoles et petites communautés de faire construire des forages de manière indépendante par le secteur privé.

Bien que la plupart des entreprises de forage manuel existantes soient techniquement capables de forer, des erreurs sont facilement commises pendant la construction et le développement des forages. De plus, la bonne construction

seule ne suffit pas à assurer une bonne qualité de l'eau et un rendement durable du forage. Pour améliorer cela, il est nécessaire et important d'avoir des connaissances en géologie et sur les eaux souterraines.

La majorité du personnel technique des entreprises de forage manuel ont cependant une éducation limitée. La plupart des publications disponibles en géologie, hydrogéologie et sur les aspects sanitaires des forages ne peuvent pas être comprises facilement sans un certain niveau de formation.

Le personnel technique est habitué à apprendre par l'expérience et la répétition. Bien sûr, des formations peuvent être dispensées à ces travailleurs mais les formations théoriques, en classe seulement, sont notoirement insuffisantes pour les équipes de forages. Elles doivent associer les aspects théoriques aux problèmes pratiques réels qui arrivent régulièrement sur les chantiers de construction de forages.

Ce manuel aborde uniquement les sujets essentiels et pertinents à l'installation pratique de forages manuels, dans un langage simple et compréhensible.*

*Remarque :

Le vocabulaire technique et la manière dont les sujets sont présentés tiennent compte de la variation du niveau d'éducation des publics ciblés. Parfois, l'emploi d'une terminologie complexe pour décrire la géologie et les aspects techniques a été évité afin de faciliter la compréhension générale du manuel. Par exemples, les termes « sols » ou encore « massif filtrant » ont été utilisé abusivement (du point de vue d'un géologue) parce qu'ils sont connus par la plupart des utilisateurs de ce manuel. Veuillez garder à l'esprit que l'objectif de ce manuel est de créer une bonne compréhension pratique du forage manuel pour les employés des équipes de forage qui peuvent avoir des connaissances académiques variables.

Lecteurs ciblés

Ce manuel de formation est écrit pour des équipes de forage manuel ayant une expérience pratique du forage dans les pays en développement. Il peut servir de guide pendant des sessions de formation (y compris par des formateurs locaux) et servir d'ouvrage de référence pour les superviseurs de forage, les ONG, les équipes de forage manuel et les entreprises pendant le forage et l'installation de forages.

Colophon

LES MANUELS DISPONIBLES DANS CETTE SERIE:

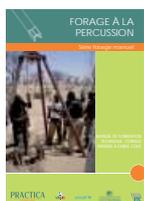
Les livrets de formation technique sur les forages manuels à moindre coût.

Ces manuels permettent une meilleure connaissance des techniques de forage manuel à faible coût pour l'approvisionnement en eau. Ils peuvent aussi servir de feuille de route pour la mise en œuvre de programmes de forage manuel. Ces manuels fournissent un aperçu complet et détaillé pour les formateurs et les équipes de forage dans l'utilisation des différentes techniques de forage pour la construction de points d'eau à moindre coût. Les techniques sont expliquées dans un langage simple et compréhensible de tous faisant référence à des illustrations et des dessins



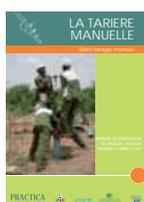
1. Série forage manuel: LE LANCAGE A L'EAU

Ce manuel décrit en détails les différentes techniques de lançage à l'eau qui peuvent être utilisées pour forer dans des formations tendres et meubles. Avec cette technique, un forage peut être réalisé en quelques heures.



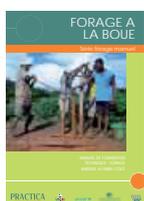
2 Série forage manuel: LA PERCUSSION

Ce manuel décrit en détails la technique de forage à la percussion. Bien que cette technique soit plus lente que les autres, elle est la seule à être en mesure de traverser des formations de roches consolidées.



3. Série forage manuel: LA TARIERE MANUELLE

Ce manuel décrit la technique de forage à la tarière manuelle. Cette technique bon marché et efficace s'avère très utile pour réaliser des petits forages dans des formations tendres et faire des sondages de sol. La plupart des équipes de forage ont recours à cette dernière en complément des autres techniques de forages.



4 Série forage manuel: FORAGE A LA BOUE (ROTA-Sludge)

Ce manuel décrit la technique de forage à la boue et plus particulièrement la technique dite du ROTA-Sludge. C'est une combinaison utilisant le forage à boue et la percussion et elle est particulièrement appréciée pour sa grande polyvalence et plage d'utilisation dans de nombreuses formations géologiques.



5 Manuel: 'Connaissances des méthodes de captage des eaux souterraines appliquées aux forages manuels'

Ce manuel vient en complément des 4 manuels de formation technique and met l'accent, avec un langage simple, sur les thématiques essentielles du forage manuel telles que l'hydrogéologie, l'hygiène, l'installation et le développement des forages

Sommaire

INTRODUCTION	2	4 LES COUPES DE FORAGE	16
Introduction	2	4.1 Pourquoi fait-on des coupes de forage ?	16
Faire un forage	2	4.2 Prendre des échantillons de sol	16
Le Manuel	2	4.3 Les profondeurs de forage	16
Informations complémentaires	2	4.4 Comment remplir les fiches de coupe de forage ?	17
1 NOTIONS DE GÉOLOGIE	3	4.5 Déterminer la profondeur de la crépine et des remblais	19
1.1 La Géologie	3	<i>La profondeur et la longueur de la crépine</i>	19
1.2 Les techniques de forage manuel	3	<i>Le décanteur (ou tube de décantation, ou encore sabot de lavage)</i>	20
<i>Diverses autres techniques</i>	4	<i>L'épaisseur du massif filtrant</i>	20
1.3 Classification et reconnaissance des sols		<i>L'épaisseur du joint d'étanchéité sanitaire</i>	20
<i>La permeability</i>	6		
<i>Quelques 'astuces' de terrain</i>	7		
<i>La porosité</i>	7		
<i>La turbidité</i>	8		
2 HYDROLOGIE	9	5 LA PRESSION DE L'EAU ET LES FLUIDES DE FORAGE	21
2.1 Hydrologie	9	5.1 Forer avec la pression de l'eau	21
2.2 La circulation des eaux souterraines	9	<i>Le prétubage</i>	21
2.3 Les aquifères	10	<i>La pression de l'eau</i>	21
2.4 L'intrusion d'eau de mer	11	<i>Le trou de forage</i>	22
2.5 Le sel, le fer et les minéraux	11	5.2 Les fluides additifs de forage	23
		<i>La bentonite</i>	23
		<i>Les autres argiles naturelles</i>	23
		<i>Les polymères</i>	23
		<i>La bouse de vache fraîche</i>	23
		<i>Les fibres végétales et les autres solides</i>	24
		5.3 Retirer les additifs du forage	24
3 LES RELATIONS ENTRE L'HYGIÈNE ET LA GÉOLOGIE	13	6 LA CONSTRUCTION DU FORAGE	25
3.1 Le choix du site d'implantation	13	6.1 La conception du forage	25
<i>Les latrines</i>	13	<i>Le diamètre du trou de forage</i>	25
<i>Les zones de décharge (dépotoirs) et les stations services</i>	13	<i>La profondeur du forage</i>	25
<i>Au soleil ou à l'ombre ?</i>	13	<i>La finalisation du forage</i>	25
3.2 Migration des pathogènes (bactéries)	14	<i>Les instruments de mesure</i>	25
<i>Dans plusieurs aquifères, figure 4</i>	14		
<i>Dans un seul aquifère, figure 5</i>	14		
3.3 Le joint d'étanchéité sanitaire	14		

6.2	Matériaux: tuyau d'équipement et crépines en PVC	26
	<i>Le diamètre et l'épaisseur des tuyaux</i>	26
	<i>Les fentes de la crépine</i>	26
	<i>Le décanteur</i>	27
	<i>L'assemblage des tuyaux</i>	27
6.3	Matériaux : le massif filtrant	27
6.4	Matériaux : le joint d'étanchéité sanitaire	28
6.5	La construction du forage	28

7 LE DÉVELOPPEMENT DU FORAGE ET LES ESSAIS DE DÉBIT 31

7.1	Le développement du forage	31
	<i>Le développement au piston</i>	31
	<i>Le développement par pompage discontinu (cycles de pompage)</i>	32
	<i>Les pompes pour le développement d'un forage</i>	32
	<i>Le pompes manuelles</i>	32
	<i>Le 'redéveloppement'</i>	32
7.2	Les essais de débit – la productivité du forage	33
	<i>La sonde piézométrique</i>	33
	<i>Les essais de débit avec des moto-pompes ou des pompes immergées</i>	33
	<i>Les essais de débit avec des pompes manuelles</i>	34
	<i>Instrument de mesure du niveau de l'eau</i>	34
7.3	Analyser la qualité de l'eau	35
	<i>Prélever des échantillons représentatifs</i>	35
	<i>La désinfection du forage – la chloration</i>	35

8 LA FINALISATION DU FORAGE 36

8.1	La dalle sanitaire en béton	36
8.2	Le puits perdu	36
8.3	Le choix de la pompe	36

GLOSSAIRE DES TERMES TECHNIQUES 37

ACKNOWLEDGEMENTS 40

ANNEXES 41

A	Réglementations spécifiques au pays	41
B	Conditions géologiques spécifiques au pays	41
C	Coupe de forage	41
D	Formulaire d'essais de débit	41
E	Chloration	41

INTRODUCTION

FAIRE UN FORAGE

La construction d'un forage utilisant les techniques de forage manuel est un procédé complexe. Avant de commencer le forage, un bon site d'implantation doit être sélectionné, où l'expérience laisse à penser qu'il y aura une quantité d'eau souterraine suffisante et de bonne qualité. Au cours de l'opération de forage, il est nécessaire d'être attentif à de nombreux aspects afin d'éviter tout problème. En plus des compétences pratiques de forage mises en œuvre à la surface du sol, il est important de comprendre ce qui se passe dans le sous-sol pendant le forage. L'eau utilisée pour forer (eau ou fluide de forage) pourrait s'échapper dans le sol ou pire, le trou pourrait s'effondrer, enfouissant ainsi une partie des outils de forage. Enfin, une fois que le trou a été foré, le tubage, la crépine et les joints d'étanchéité sanitaires doivent être installés à la bonne profondeur, pour assurer un rendement suffisant et empêcher de l'eau contaminée de rentrer.

Dans de nombreux pays, les équipes de forage manuel rencontrent divers problèmes de sélection du site de forage, de perte de fluide de forage, de détermination des types de sols, de profil stratigraphique de forage, d'équipement et développement du forage, de qualité de l'eau et de rendement (débit). Ces problèmes arrivent couramment lorsque le forage n'est pas compris dans sa totalité et que des étapes importantes sont omises.

Ce manuel traite de nombreux sujets et décrit des problèmes que vous pouvez rencontrer en forant. Il vous aidera à comprendre le processus de forage, aussi bien à la surface que dans le sous-sol. L'ensemble de ces informations vous permettra de comprendre ce qui se passe dans le trou pendant le forage, et de réaliser un travail professionnel en construisant des forages d'eau de grande qualité.

LE MANUEL

Comment utiliser ce manuel ? Le sommaire (voir la page précédente) présente une vue d'ensemble des sujets traités, ainsi que les pages où les trouver.

Les chapitres 1 à 8 contiennent toutes les informations nécessaires à une bonne compréhension du processus de construction d'un forage. En annexes, vous trouverez des réglementations spécifiques à votre pays. Celles-ci sont définies par le gouvernement ou l'ONG pour laquelle vous travaillez, et ont été conçues pour des forages communautaires. Vous trouverez également en annexes certaines conditions géologiques spécifiques à la zone ou au pays dans lequel vous travaillez. Enfin, un modèle simple de profil stratigraphique 'vide' a été inclus, pour être photocopié et utilisé sur le terrain.

INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Les décideurs politiques, les responsables de projets, les ONG exécutant des projets, les formateurs et les superviseurs, pourront obtenir des informations plus détaillées sur le sujet traité en consultant la liste des ouvrages de référence située à la fin de ce manuel.

1 NOTIONS DE GÉOLOGIE

1.1 LA GÉOLOGIE

La géologie est *l'étude de la terre*. Elle décrit les origines et la formation des types de roches sous la surface du sol. Les matériaux originels de la terre sont les roches dures comme les *granites* et les *formations volcaniques*, qui se sont formées quand de la matière en fusion s'est refroidie sous la terre ou à sa surface. On les appelle *roches magmatiques* ("solidification de la matière en fusion"). C'est à partir de ces roches qu'ont été formées les *couches sédimentaires*.

Les couches sédimentaires sont formées par *l'érosion*, le transport (par le vent ou les rivières) et le *dépôt* (sédiments) de particules des roches originelles. La taille de ces particules peut être très fine (particules d'argiles), moyenne (limon), ou grande (sable et graviers). Les couches sédimentaires peuvent être *non consolidées* (meubles comme l'argile ou le sable) ou *cimentées* (*consolidée*) pour former des roches plus dures comme le grès ou le calcaire.

Quelques exemples :

Les *particules d'argile* d'une couche d'argile que vous avez rencontrée pendant un forage peuvent venir d'ailleurs. Ces particules ont été formées par l'effritement de roches. Elles peuvent ensuite avoir été érodées et transportées jusqu'à votre site de forage par une rivière ou par la mer. Enfin, ces particules d'argiles se sont *déposées* (sédimentées, décantées) dans de l'eau stagnante, par exemple dans un lac.

De la même manière, une couche de *sable* ou de *gravier* peut s'être déposée. Les particules de sable et de gravier peuvent avoir été transportées par une rivière et s'être déposées le long de son lit. Bien qu'il n'y ait peut-être plus de rivière ou de lac aujourd'hui, le dépôt de ces particules peut s'être passé des milliers ou même des millions d'années auparavant. Un autre mode de transport des particules est le transport éolien (vent). Des particules peuvent être transportées d'un endroit à un autre par le vent.

Quand un mélange de sable et de particules fines a été *compacté* par la pression résultant du poids des couches situées au-dessus, et *cimenté* par les minéraux présents dans ce mélange, cela forme du grès. Le grès est dur et peut ressembler à une roche solide, mais il est en fait formé à partir de *sédiments consolidés*, et peut être foré manuellement.

Il ne s'agit que de quelques exemples de base. Il serait trop long de décrire en détail le dépôt de toutes les couches sédimentaires. Les couches sédimentaires de la surface de la terre sont les plus importantes pour les foreurs manuels. Les couches dures comme le grès, l'argile compactée, les fragments de roche non érodés et la latérite posent plus de problèmes pour le forage manuel, en raison de leur dureté.

1.2 LES TECHNIQUES DE FORAGE MANUEL

Pour forer à travers tous ces différents types de formations (sols), de nombreuses techniques de forage manuel ont été développées et sont utilisées de par le monde. Dans tous les cas, la technique de forage doit (a) casser ou couper la formation, (b) dégager les matériaux coupés (le sol) du trou, et (c) si nécessaire, fournir un support aux parois du trou, pour éviter qu'il ne s'effondre pendant le forage. Voici une brève présentation des principales techniques :



Une tarière manuelle

LE FORAGE A LA TARIERE consiste à un ensemble d'allonges en acier qui est tourné par une poignée. Différents types de tarières peuvent être fixées à l'extrémité des allonges. Les tarières sont tournées dans le sol jusqu'à ce qu'elles se remplissent et sont ensuite sorties du trou pour être vidées. Le modèle des tarières varie en fonction du type de formation (type de sol) à forer.

Généralement au-dessus du niveau statique, le trou du forage reste ouvert sans avoir besoin d'être soutenu. Une fois dans la nappe, un pré-tubage temporaire peut être utilisé pour empêcher l'effondrement des parois du trou du forage. Le fonçage se poursuit à l'intérieur de ce pré-tubage à l'aide d'une tarière de mise en eau jusqu'à ce que la profondeur désirée soit atteinte. Puis, le tubage permanent est installé et le pré-tubage temporaire remonté à la surface. Le forage à la tarière peut être utilisé jusqu'à une profondeur d'environ 15 à 25 mètres, cela dépend de la géologie.

Avantage : facile à utiliser au-dessus du niveau de la nappe.
Equipements bons marchés.

Inconvénient : il est parfois très difficile d'enlever le pré-tubage temporaire.

Application géologique : sables, limons & argiles tendres.



La foreuse rotative à boue en action

LE FORAGE A LA BOUE (ou forage rotatif à boue lorsqu'un mouvement de rotation de l'outil de fonçage est actionné) utilise la circulation de l'eau pour faire remonter à la surface du sol les matériaux forés. Le train de tiges de forage est actionné de haut en bas. Pendant la descente des tiges, le choc créé par le trépan fixé au bout du train de tiges ameubli/fragmente les matériaux du sol et pendant le mouvement de remontée, l'extrémité du train de tiges est obturée avec la main (effet de soupape), créant ainsi une aspiration de l'eau et des débris qu'elle contient jusqu'à la surface. Au cours du mouvement de descente suivant, la main est retirée du train de tiges et l'eau gicle dans le bassin préalablement creusé à côté du forage. Dans ce bassin de décantation, les débris se séparent de l'eau pour se déposer au fond du bassin alors que l'excédent d'eau redescend à nouveau dans le trou. La pression de l'eau sur les parois du forage évite l'effondrement de ces dernières. Le forage à boue (avec ou sans rotation) peut être utilisé jusqu'à une profondeur d'environ 35 mètres.

Avantage : simple d'utilisation et pas besoin de pré-tubage.

Inconvénient : le niveau d'eau dans le trou doit être maintenu tout au long de l'opération de fonçage. Le niveau de la nappe n'est pas connu avec précision pendant le forage.

Application géologique : sables, limons, argiles, argiles dures et des formations légèrement consolidées (latérite altérée).



Le lançage à l'eau

LE LANÇAGE A L'EAU est également basé sur la circulation et la pression de l'eau. A la différence du forage à boue, l'eau est désormais injectée à l'intérieur du train de tiges et la boue (eau et débris) remonte le long des parois du forage. Afin d'obtenir une pression d'eau suffisante, on utilise une motopompe. On peut laisser l'extrémité inférieure du tuyau de forage simplement ouverte, ou on peut y rajouter un outil de fonçage (trépan). On peut également faire tourner totalement ou partiellement le train de tiges.

Un fluide de forage (additif) peut être mélangé à l'eau pour éviter l'effondrement des parois du trou et la perte incontrôlée de l'eau par infiltration. La technique du lançage à l'eau (avec rotation) peut être utilisée jusqu'à une profondeur d'environ 35-45 mètres.

Avantage : très rapide dans le sable.

Inconvénient : nécessite beaucoup d'eau à la fois. Le niveau de la nappe d'eau n'est pas connu avec précision pendant le forage.

Application géologique : limitée aux sables et fines couches d'argile tendre.



Outil de battage manuel au trépan

LE FORAGE A LA PERCUSSION utilise un lourd trépan (ou cuiller) attaché à une corde ou un câble, lequel est descendu dans le trou du forage ou à l'intérieur d'un pré-tubage. Un trépied (ou chèvre) est en général utilisé pour suspendre l'équipement. En actionnant la corde ou le câble de haut en bas, le trépan ameublie et fragmente le sol ou la roche consolidée dans le trou de forage, dont les débris sont ensuite extraits grâce à la cuiller.

Comme pour le forage à la tarière, un pré-tubage en métal ou PVC peut être utilisé pour éviter l'effondrement du trou. Une fois le tubage définitif (tuyaux et crépines en PVC) installé, le pré-tubage doit être enlevé. Le forage à percussion est généralement utilisé jusqu'à une profondeur de 25 mètres.

Avantage : permet de forer dans les formations dures.

Inconvénient : l'équipement peut être très lourd et relativement cher. Cette méthode est lente en comparaison aux autres méthodes.

Application géologique : sables, limons, argiles dures, calcaire tendre, latérite, les couches contenant des graviers et des petits cailloux.

Diverses autres techniques

Les différentes techniques de forage peuvent être classées en 4 groupes principaux : le forage à la Tarière, à la Percussion, à la Boue et au Lançage à l'eau. Une large gamme de techniques dérivant de ces 4 grands principes s'est développée à travers le monde.

1.3 CLASSIFICATION ET RECONNAISSANCE DES SOLS

L'une des qualités essentielles d'un foreur professionnel est sa capacité à reconnaître et décrire les différents types de sols (formations) rencontrés au cours du forçage. Le tableau suivant montre une classification des différentes particules dans un échantillon de sol (une description plus détaillée est donnée dans le glossaire des termes techniques à la fin de ce manuel) :

Nom des particules	Taille des particules
Argile	< 0,004 mm
Limon	0,004 – 0,06 mm
Sable (fin, moyen, grossier)	0,06 – 2,0 mm
Gravier	2,0 – 64 mm
Cailloux et pierres	> 64 mm

Pour la construction d'un forage de bonne qualité, il est essentiel de connaître les *caractéristiques* des différents sols et leur influence sur le rendement (débit du forage), la qualité de l'eau et la performance du forage. En fait, connaître les caractéristiques des sols est bien plus important que connaître leur nom.

Avant toute chose, il est très important de savoir si les types de sols forés sont *perméables* ou *imperméables*.

La perméabilité

La perméabilité est une mesure de la capacité d'un type de sol (ou formation) à se laisser traverser par l'eau. En d'autres termes ;

Figure 1 ; le bleu représente l'eau, le blanc représente le sol



Le sable et le gravier

Si l'on met du sable grossier ou du gravier dans un seau dont le fond est percé, et que l'on verse de l'eau par-dessus, l'eau circule facilement à travers le sable jusqu'au fond du seau (fig. 1). L'eau coule facilement dans les pores (les espaces) entre les grains. Conclusion : l'eau *coule facilement* à travers le sable et le gravier. Le sable et le gravier sont donc très *perméables*. Quand une crépine est installée dans une couche de sable ou de gravier, l'eau coule facilement à travers le sable jusqu'à la crépine du forage (fig. 2) et le débit d'eau sera important. Cependant, quand on fore avec la pression de l'eau (voir le paragraphe 5.1) 'l'eau de travail' s'infiltrer elle aussi facilement du trou de forage jusque dans la couche de sable.

L'argile et le limon

L'argile et le limon se comportent de manière inverse. Si l'on met de l'argile humide (compressée comme dans une couche de sol) dans un seau et que l'on verse de l'eau par-dessus, l'eau restera au-dessus (fig. 1). Les particules d'argile sont très petites (et 'collantes'), de même que les pores entre les particules. Conclusion : l'eau ne *circule PAS facilement* à travers l'argile. L'argile est donc décrite comme *non perméable* ou *imperméable*. Si l'on installe une crépine dans une couche d'argile, le débit d'eau dans le forage sera très faible (fig. 2) (dans ce cas, quand on fore avec la pression de l'eau (paragraphe 5.1), aucun additif (paragraphe 5.2) n'est nécessaire).

Figure 2: La perméabilité



Les formations mixtes

Dans la plupart des cas, les formations sont un mélange de particules d'argile, de limon, de sable et de gravier. Par exemple, l'argile et le sable peuvent se trouver ensemble (argile sableuse) sous forme d'une couche homogène (l'argile et le sable sont mélangés) ou d'une alternance de fines couches de sable et d'argile (les unes sur les autres). Quand ces sols sont mis dans un seau et que l'on verse de l'eau par-dessus, l'eau coule lentement à travers le sol (fig. 1).

Conclusion : l'eau coule *lentement* à travers les sols mélangés qui sont donc décrits comme peu perméables. Si l'on place une crépine dans une couche mélangée ou alternée, le débit du forage sera faible (fig. 2).

Quelques 'astuces' de terrain

Il est parfois difficile de faire la différence entre des couches *perméables* ou *imperméables*.

Voici une petite astuce pour vous aider :

Prenez un échantillon représentatif du sol (paragraphe 4.2) et faites en une boule en le roulant entre vos mains. Faites ensuite tomber la boule sur le sol en la lâchant d'une hauteur d'environ 1 mètre.

1. Si la boule est faite de particules non cohésives (non-collantes), elle se brise complètement. Dans ce cas, le sol est *perméable*. Les particules de sable ou de gravier seront nettement visibles.
2. Si la boule se brise seulement en partie, le sol contient des morceaux de limon ou d'argile et du sable. Cette formation aura une *faible perméabilité*.
3. Si la boule ne fait que se déformer ou reste plus ou moins de la même forme, elle est composée d'argile, et peut être décrite comme *imperméable*.

La porosité

Les couches sédimentaires sont composées de nombreuses particules comme le sable, le limon et l'argile. Entre ces particules, il y a beaucoup d'espace libre, que l'on appelle pores. La porosité est une mesure du pourcentage d'espace libre dans une formation. Une porosité de 30% signifie que 30% du volume total de l'échantillon est de l'espace libre, alors que les 70% restants sont occupés par les particules. Les pores peuvent être remplis avec de l'eau.



Bouteilles d'eau de turbidité faible à élevée

La turbidité

La turbidité est un mot compliqué pour désigner le caractère *trouble* de l'eau, causé par de très petites particules (appelées particules en suspension), un peu comme de la fumée dans l'air. Les particules d'argile et de limon sont très petites. Quand ces particules sont dans l'eau, elles la rendent turbide, ou trouble. Si l'eau d'un forage est extraite d'une couche d'argile ou de limon, certaines particules fines de la formation peuvent être transportées par l'eau et se mettre en suspension (se mélanger) dans l'eau. L'eau peut alors paraître trouble.

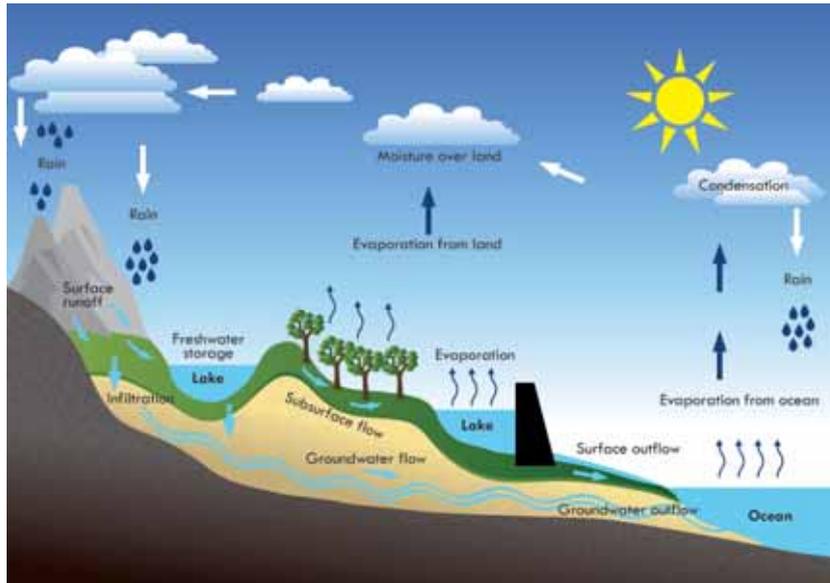
Conclusion

Continuez toujours à forer jusqu'à atteindre une *couche perméable épaisse* (sable ou gravier) et installez toute la crépine dans cette couche. Si la couche est perméable, le débit du forage sera important (le forage sera très productif). De plus, quand la couche est faite de sable ne contenant pas de très petites particules, l'eau sera très claire (non turbide).

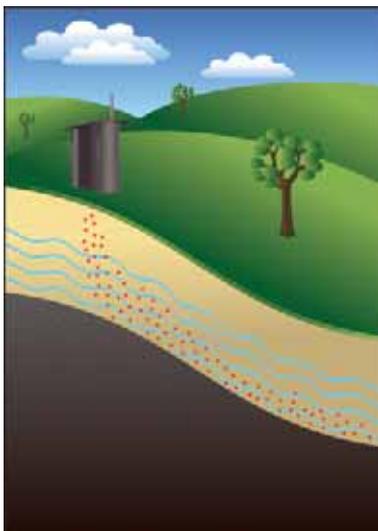
2 HYDROLOGIE

2.1 HYDROLOGIE

L'hydrologie décrit le cycle de l'eau, à partir du moment où elle s'évapore de la mer et de la surface de la terre. Cette vapeur d'eau forme des nuages, qui retombent ensuite quelque part sur le sol sous forme de pluie. Une partie de cette eau s'infiltrate dans le sol et devient de l'eau souterraine, alors qu'une autre partie coule dans les cours d'eau et les rivières, et rejoint à nouveau la mer. De là, le cycle de l'eau peut recommencer.



Pour les foreurs, il est particulièrement important de connaître l'emplacement de l'eau souterraine, ses mouvements (sens d'écoulement) dans les couches perméables contenant de l'eau (aquifères), ainsi que les facteurs affectant sa qualité.



Latrine et sens d'écoulement de l'eau

2.2 LA CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES

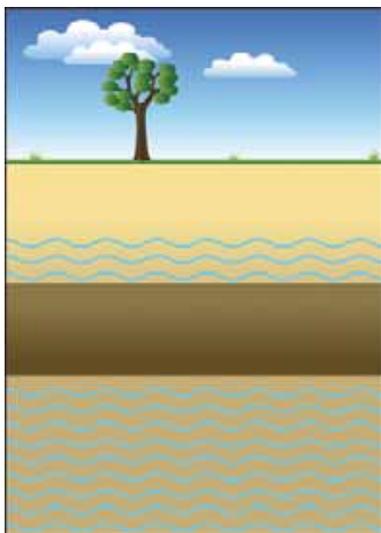
De même que l'eau de surface coule dans une rivière, l'eau souterraine coule (mais beaucoup plus lentement) à travers les pores et les fissures d'une formation (l'eau souterraine n'est pas immobile). Il n'est pas toujours facile de déterminer le sens d'écoulement de l'eau souterraine. Pourtant, cela peut être très important pour la qualité de l'eau du forage de savoir d'où cette eau est venue et dans quelle direction elle coule. Imaginez une latrine proche d'un forage qui est utilisé pour l'eau potable. Vous ne voudriez certainement pas que des bactéries, virus et parasites (micro-organismes appelés pathogènes provoquant des maladies), venant des latrines, circulent dans les eaux souterraines jusque dans votre forage (paragraphe 3.1, latrines) ?

Bien qu'il soit difficile de prédire le sens d'écoulement des eaux souterraines sans avoir recours à des recherches pointues ; pour les eaux peu profondes, l'observation du relief (paysage) peut apporter de précieuses informations. Par exemple, lorsqu'une latrine est située sur la pente d'une colline ou d'une montagne, la nappe d'eau (contenant des bactéries issues de la latrine) est susceptible de s'écouler dans le sens de la pente de la colline. Dans ce cas, il ne serait pas pertinent de réaliser un forage en aval de la latrine. Il est donc préférable de construire le forage au même niveau que la latrine, voir même au dessus.

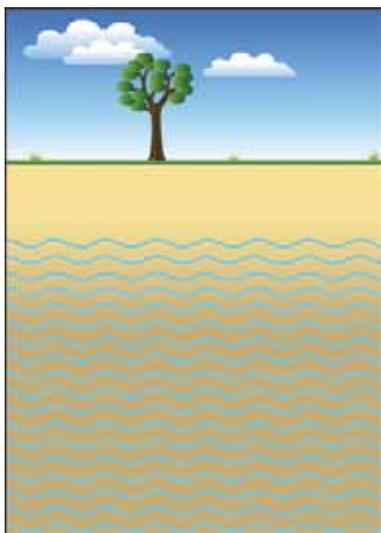
Lorsque le relief est peu vallonné, la présence d'un oued, d'un cours d'eau ou d'une rivière est souvent un bon indicateur pour déterminer le sens de circulation des eaux souterraines. Les rivières coulent toujours en direction des points bas de la topographie. Et l'eau souterraine, elle, coule généralement vers les rivières. Attention : ceci n'est vrai que pour les cours d'eau naturels, pas pour les canaux construits pour les activités humaines. Il n'est JAMAIS conseillé de construire un forage *en aval* d'une latrine.

Le bassin versant

L'eau souterraine est rechargée par l'infiltration de la pluie à travers le sol et, finalement, coule vers des zones basses et vers les rivières. Bien qu'il soit impossible de voir cela à la surface (sans études approfondies), essayez toujours d'imaginer dans quelle direction coule l'eau souterraine, en particulier pendant la saison sèche. En haut d'une montagne par exemple, le niveau de l'eau souterraine peut baisser considérablement pendant la saison sèche, parce qu'à ce moment là, l'eau souterraine qui coule à travers les pores de la formation vers les zones les plus basses n'est pas remplacée par de l'eau de pluie qui s'infiltré. Le niveau de l'eau souterraine ne remontera que quand les nouvelles pluies commenceront.



Différents aquifères



Un seul aquifère

2.3 LES AQUIFÈRES

Le mot 'aquifère' désigne simplement 'une couche de sol contenant de l'eau'. Un bon aquifère pour l'installation d'une crépine est une couche perméable sous le niveau de la nappe d'eau souterraine (paragraphe 1.3). Au cours du fonçage, vous pouvez rencontrer plusieurs aquifères à différentes profondeurs, séparés par des couches imperméables.

L'aquifère superficiel ou nappe phréatique

L'aquifère le plus haut est appelé 'phréatique'. Une partie de l'eau de pluie s'infiltré dans le sol. Cette eau s'écoule vers le bas et quand elle atteint le niveau de l'eau, elle rejoint cet aquifère. L'eau peut emmener avec elle de la pollution (comme des bactéries ou des pesticides) dans l'eau souterraine. Un aquifère phréatique est donc sujet à des pollutions issues des activités menées à la surface du sol (paragraphe 3.1). L'eau souterraine phréatique est située dans une couche perméable au-dessus d'une couche imperméable. Si cette couche d'eau souterraine est épaisse de quelques mètres seulement, elle peut s'assécher pendant la saison sèche, laissant ainsi votre forage vide d'eau.

Le second aquifère

L'aquifère suivant, recouvert par une couche imperméable (par exemple, une couche d'argile) est appelée le 'second' aquifère. La couche imperméable, située au-dessus de cette couche contenant de l'eau, forme une barrière pour les bactéries et pollutions et les empêche de voyager dans le second aquifère (s'il vous plaît, voir le paragraphe 3.2 !).

! S'il existe deux aquifères, il est généralement préférable d'installer la crépine dans le second.

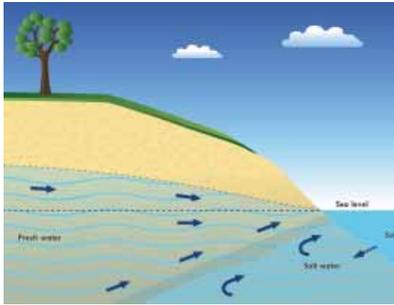
En dessous du second aquifère, il peut y avoir une seconde couche imperméable et un troisième aquifère.

Un seul aquifère

Parfois, il existe seulement un aquifère. Dans ce cas, il est recommandé de forer aussi profond que possible pour empêcher l'intrusion de bactéries et de pollution dans le forage. Forer profond réduit aussi la probabilité que le forage s'assèche à cause des variations saisonnières de la nappe d'eau (différence de niveau entre la saison des pluies et la saison sèche).

! Voir le chapitre 3, pour de plus amples explications et informations sur les aquifères et l'hygiène

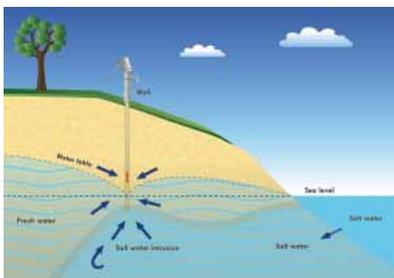
2.4 L'INTRUSION D'EAU DE MER



De l'eau douce au-dessus d'eau salée

Dans les zones côtières, un aquifère profond peut contenir du sel. Pendant la saison sèche, quand le niveau de la nappe est plus bas, de l'eau de mer salée peut également pénétrer sous la terre. Quand cela arrive, on parle d'*intrusion d'eau de mer*. L'eau salée est plus lourde que l'eau douce. L'eau douce a donc tendance à flotter au-dessus de la couche d'eau salée.

Quand on creuse un forage dans une zone côtière sujette à des intrusions d'eau de mer, l'eau salée peut parfois se déplacer vers le haut, à cause du pompage dans le forage (voir le schéma).



Intrusion d'eau de mer

Par conséquent, dans les zones côtières, forer au plus profond n'est PAS toujours la meilleure option.

2.5 LE SEL, LE FER ET LES MINÉRAUX

En plus des pollutions venant de la surface (bactéries et produits chimiques, paragraphe 3.1) ou du sel venant de la mer (paragraphe 2.4), l'eau peut avoir un mauvais goût ou être dangereuse pour la santé à cause de minéraux naturels présents dans l'aquifère. Ces minéraux sont présents dans le sol depuis la formation des différentes couches géologiques et sont maintenant dissous dans l'eau souterraine. Quelques exemples connus de *minéraux naturels* (produits chimiques naturels) dans l'eau souterraine sont le Calcium, le Chlorure, le Carbonate, l'Arsenic, le Fluor et le Fer, mais il en existe beaucoup d'autres. Quelques minéraux, comme l'Arsenic et le Fluor, peuvent être très dangereux pour la santé, et un échantillon d'eau souterraine doit par conséquent être analysé dans un laboratoire pour déterminer si elle contient ces composants chimiques ou non. Heureusement, dans la plupart des endroits les concentrations de ces minéraux sont faibles et l'eau peut être consommée sans danger.

Quelques exemples:

Le sel

Quand l'eau d'un forage dans une zone non côtière a un goût salé, il est important de déterminer l'origine de ce sel. Par exemple, si d'autres forages sont forés et équipés dans la même zone, mais à des profondeurs différentes (plus ou moins profonds), il se pourrait que leur eau soit douce, ou moins salée (testez simplement la différence de goût entre l'eau des différents forages). Regardez la différence de couleurs ou de cristaux dans les échantillons de sol pendant le forage, le sel peut venir de là.

Le fer

La même approche peut être utilisée quand on trouve du fer dans l'eau. L'eau a parfois un mauvais goût métallique, et sa couleur devient brune quand on la garde longtemps dans un seau ou qu'on la fait bouillir. L'eau peut également faire des tâches couleur de rouille sur les vêtements ou les ustensiles de cuisine. Ceci indique la présence de fortes concentrations de fer. L'eau très ferreuse peut dissuader les gens d'utiliser cette source. Le fer est un élément très commun dans l'eau souterraine.



'Eau tourbeuse'

La tourbe

Quand, au cours d'un forage, on trouve des restes de vieilles plantes, il est recommandé de ne pas installer une crépine dans cette couche. Ces déchets de plantes, sous le niveau de la nappe d'eau, se décomposent très lentement et acidifient l'eau. Un exemple commun est la tourbe. L'eau souterraine extraite d'une couche tourbeuse sent comme les plantes en décomposition, et elle est très brune et très acide (voir la photographie).

Eau souterraine acide (pH faible)

Le pH est la mesure de l'*acidité* de l'eau. Si le pH de l'eau est faible, elle est acide. Dans les zones où l'eau souterraine est acide (son pH est faible), cette acidité peut endommager (par corrosion) les composants (parties) métalliques de la pompe manuelle. Dans de tels cas, on peut envisager d'installer une pompe avec des composants en PVC ou en plastique.

La dureté de l'eau

Si l'eau d'un forage contient beaucoup de minéraux de calcium (par exemple quand on fore dans du grès ou de la craie) et de magnésium, on dit que *l'eau est dure*. Cette eau n'est en général pas dangereuse pour la santé (elle est potable). Cependant, elle peut poser quelques problèmes quand on fait la lessive : le savon mousse facilement dans l'eau douce mais pas dans l'eau 'dure'. En d'autres termes, si la dureté de l'eau est élevée il peut être difficile d'utiliser du savon.

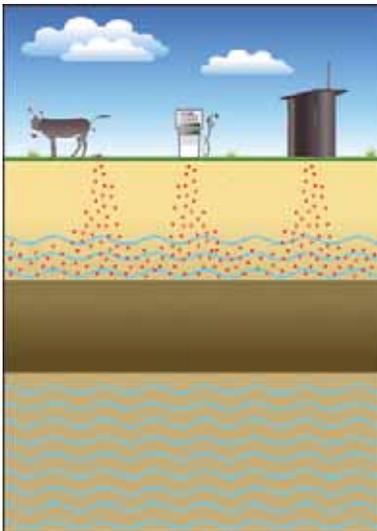
3 LES RELATIONS ENTRE L'HYGIÈNE ET LA GÉOLOGIE

3.1 LE CHOIX DU SITE D'IMPLANTATION

Avant de commencer un nouveau chantier de forage, un bon *site d'implantation* doit être trouvé. Dans la plupart des cas, les villageois ou propriétaires du futur forage vont vous indiquer un site qui leur convient, en tant qu'usagers. Mais ce site n'est PAS nécessairement le meilleur choix pour avoir l'eau de la meilleure qualité ! En tant que foreur professionnel, vous aurez la responsabilité d'informer vos clients sur l'hygiène et sur le site le plus hygiénique pour leur forage.

Il faut retenir deux aspects importants :

- La présence de sources de pollution comme les *latrines*, *zones de décharges (déchets)*, *de feux* et *les stations services*
- L'implantation du forage au *soleil* ou à *l'ombre*



3 pollutions de l'aquifère

Les latrines

Certains peuvent trouver pratique de faire construire leur forage près de leur maison ou de leur latrine. Malheureusement, en faisant cela, ils ne réalisent peut-être pas qu'un forage près d'une latrine pourrait être contaminé avec des (micro) organismes comme les bactéries, *virus* et *parasites*. Certains de ces organismes, que l'on appelle *pathogènes*, peuvent causer des maladies (comme la diarrhée) quand l'eau est utilisée pour boire. Ces *pathogènes* issus des déchets humains présents dans les latrines s'infiltrent dans le sol, à *travers les couches perméables*, et peuvent ainsi contaminer l'eau souterraine (voir la figure 3). Bien que les *pathogènes* ne survivent pas longtemps en-dehors du corps humain, il faut un certain temps pour qu'ils meurent complètement. L'eau souterraine proche des latrines peut donc contenir des *pathogènes* vivants et dangereux. Pour sélectionner un bon site pour le forage, il est recommandé de ne PAS construire le forage *plus bas* ou *en aval* (paragraphe 2.2) d'une latrine. S'il est difficile de déterminer la direction d'écoulement de l'eau souterraine, construisez le forage à au moins 30 mètres de toutes latrines.

Les zones de décharge (dépotoirs) et les stations services

Les mêmes règles s'appliquent aux zones où l'on jette et brûle des *déchets*, ou où se trouvent du *carburant* ou d'autres polluants (par exemple des *pesticides* dans une ferme), qui peuvent s'infiltrer dans l'eau souterraine et la contaminer. Les produits chimiques dans l'eau de boisson peuvent avoir des conséquences graves sur la santé (dysfonctionnement ou déformation de certaines parties du corps).

Au soleil ou à l'ombre ?

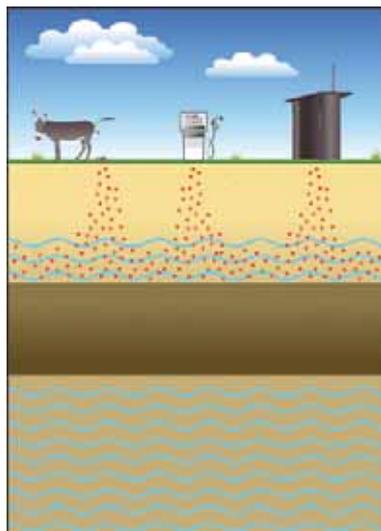
Alors que les foreurs préfèrent travailler à l'ombre, ce n'est PAS le meilleur emplacement pour un forage. Beaucoup de gens vont venir chercher de l'eau au forage, sans savoir que des *pathogènes* dangereux peuvent voyager sous leurs pieds. Par exemple, ces bactéries peuvent provenir des ordures ménagères déposées dans la rue ou d'une latrine. Ces bactéries pourront être transportées puis déposées à proximité du point d'eau qui est souvent une zone détrempée. Ces polluants représentent une menace pour la qualité de l'eau potable. Quand un forage est placé à l'ombre, les *bactéries* et les *algues* peuvent se développer (voir la photographie). Si les alentours du forage peuvent sécher au soleil tous les jours, la lumière du soleil va les *désinfecter* en tuant tous les *pathogènes*.



Présence de bactéries indiquée par les algues

3.2 MIGRATION DES PATHOGÈNES (BACTÉRIES)

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, les *pathogènes (bactéries, virus et parasites)* et les polluants *s'infiltrent* dans le sol en même temps que l'eau (de pluie) et rejoignent l'eau souterraine en circulant à travers les couches perméables du sol. Une fois dans l'eau souterraine, les *pathogènes* et les polluants se déplacent *horizontalement* (gauche-droite), mais aussi *verticalement* (du haut vers le bas), vers les profondeurs de l'aquifère (voir le paragraphe 2.3).



4 Migration des bactéries dans plusieurs aquifères

Dans plusieurs aquifères, figure 4

Dans le paragraphe 1.3, nous avons vu que l'eau souterraine coule facilement à travers les couches perméables (aquifères) comme le sable et le gravier. Les *pathogènes* et les *polluants chimiques* qui sont en suspension (mélangés avec) ou dissouts dans cette eau souterraine *migrent (se déplacent) aussi facilement à travers les couches perméables !*

L'eau contenant des *pathogènes* doit être bloquée avant d'atteindre les alentours de la crépine d'un forage.

Heureusement, on trouve souvent des couches *imperméables*. L'eau, et donc les *pathogènes* dans cette eau, *ne peuvent pas traverser facilement ces couches imperméables*. Grâce à leur texture très fine (particules très fines), les couches imperméables empêchent les *pathogènes* de se déplacer plus bas, vers l'aquifère d'en-dessous. Comme les couches imperméables *bloquent les pathogènes* et les empêchent d'aller plus bas, l'aquifère du dessous contient de l'eau mais pas de *pathogènes* ni de produits chimiques dangereux venant de la surface.

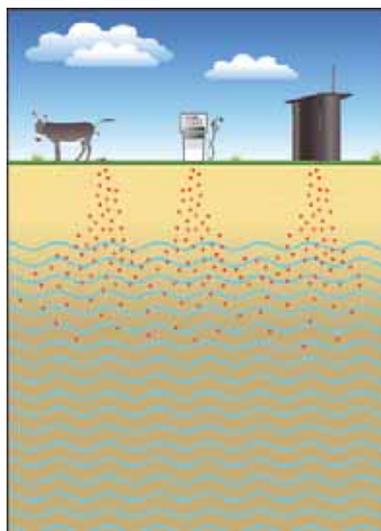
(figure 4).

Dans un seul aquifère, figure 5

Cependant, il n'existe parfois qu'un seul aquifère qui puisse être atteint avec le matériel de forage manuel, par exemple une couche perméable de sable de 50 mètres d'épaisseur.

Bien qu'il n'y ait pas de couche imperméable dans ce cas, plus on descend profond dans la couche de sable plus le nombre de *pathogènes vivants* va diminuer (à chaque fois que l'on descend d'un mètre, le nombre de *pathogènes* diminue). Cela prend du temps aux *pathogènes* pour se déplacer vers le bas, et en voyageant, ils meurent petit à petit.

Cependant, il n'y a pas de couche imperméable, qui peut empêcher les *pathogènes* et les autres polluants d'aller plus bas, et qui marque la profondeur exacte à laquelle les contaminants ne sont plus présents dans l'eau (figure 5). Dans les sites où il n'existe qu'un seul aquifère, il est donc recommandé de forer aussi profondément que possible.



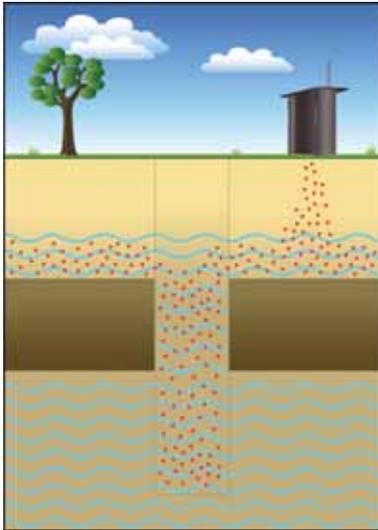
5 Migration des bactéries dans un aquifère

3.3 LE JOINT D'ÉTANCHÉITÉ SANITAIRE

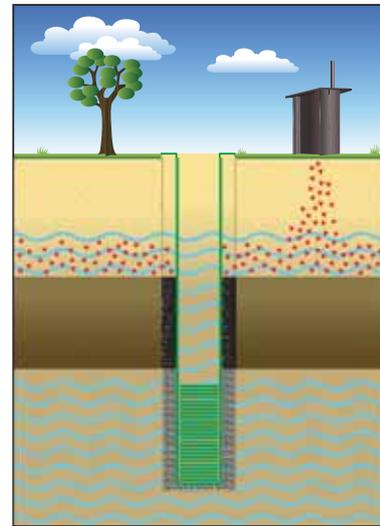
Dans le paragraphe précédent, nous avons appris à forer à travers la couche imperméable jusqu'au second aquifère, pour trouver de l'eau de bonne qualité. Mais en procédant ainsi, nous créons un nouveau problème !

En forant à travers la couche imperméable, nous créons une connexion (un passage) entre le premier et le second aquifère. Forer un trou à travers une couche imperméable est un peu comme 'enlever le bouchon d'un lavabo', permettant ainsi aux polluants de couler du premier aquifère, qui est contaminée, vers celui d'en dessous, qui est propre, et d'entrer dans la crépine du forage (figure 6).

! Pour empêcher les pathogènes et les produits chimiques d'entrer dans la crépine et de polluer le second aquifère, on doit placer un *joint d'étanchéité sanitaire* (merci de voir le paragraphe 6.4).



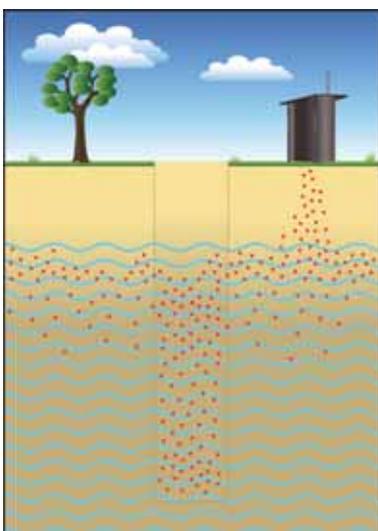
6 Migration des bactéries à travers différents aquifères



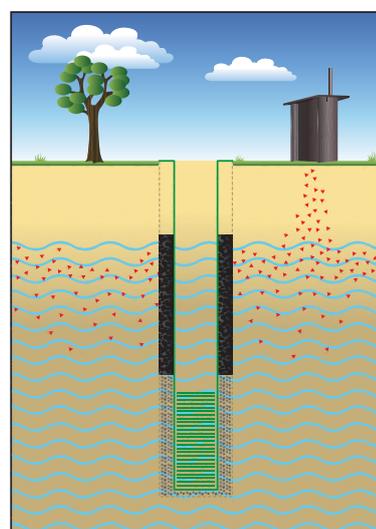
7 Migration des bactéries à travers différents aquifères avec un forage et un joint d'étanchéité sanitaire

Lorsque l'on équipe un forage, on met en place une crépine et on installe un massif filtrant autour de celle-ci (paragraphe 6.5). La couche imperméable doit ensuite être scellée (refermée), pour empêcher les polluants de s'infiltrer dans le second aquifère. On réalise pour cela un *joint d'étanchéité sanitaire*. Le *joint d'étanchéité sanitaire* (paragraphe 6.4) est fait en ciment ou en bentonite (une argile naturelle qui augmente beaucoup de volume quand elle est humide) et va sceller à nouveau (refermer) la couche imperméable (voir la figure 7).

Quand il n'existe qu'un *seul aquifère* (figure 8), un joint d'étanchéité sanitaire d'une épaisseur d'au moins 3 à 5 mètres doit être installé au-dessus du massif filtrant, pour empêcher les polluants d'entrer dans la crépine (figure 9). L'eau (et les pathogènes) peut circuler plus facilement dans les matériaux ameublés par le forage que dans le sol qui n'a pas été foré. Un joint imperméable va donc forcer l'eau à couler à travers le sol qui n'a pas été foré, augmentant ainsi le temps de voyage entre la surface et la crépine (donc les pathogènes ont plus de temps pour mourir).



8 Migration des bactéries à travers un seul aquifère jusqu'au forage



9 Migration des bactéries à travers un seul aquifère avec un forage et un joint d'étanchéité sanitaire

4 LES COUPES DE FORAGE

4.1 POURQUOI FAIT-ON DES COUPES DE FORAGE ?

Dans le chapitre 1, nous avons appris à installer la crépine dans une *couche perméable*. Le chapitre 2 nous a montré qu'il pouvait exister *plusieurs aquifères*. Dans le chapitre 3, nous avons vu la nécessité d'installer un *joint d'étanchéité sanitaire au-dessus du massif filtrant* (qui entoure la crépine) et/ou de sceller la couche imperméable au-dessus du second aquifère. Tous ces aspects sont importants pour l'équipement d'un forage avec un bon débit, de l'eau propre et claire sans présence de bactéries.

! Il est donc très important de déterminer la localisation exacte (profondeur) des *couches perméables (aquifères)*, et la localisation de toute couche *imperméable* dans notre forage !

Pour y arriver, nous pouvons remplir une *coupe de forage*, simplement mais avec précision. Une coupe de forage est une archive écrite des formations géologiques (couches de sol) forées, et de leur profondeur. Des échantillons de sol doivent être prélevés et décrits à des intervalles de profondeur réguliers (par exemple, tous les mètres) tout au long du forage. La description des sols est ensuite archivée sous la forme d'une coupe de forage. La coupe de forage nous aidera à déterminer :

1. Le *meilleur* aquifère pour l'installation de la crépine
2. La profondeur et la longueur de la *crépine*
3. La profondeur et l'épaisseur *du massif filtrant*
4. La localisation du *joint d'étanchéité sanitaire*

Base de données

En plus de leur utilité directe sur le terrain, les coupes de forage sont également très importantes pour archiver les informations hydrogéologiques du site de forage. Par exemple, si plus tard d'autres forages doivent être réalisés dans le même village ou dans la même zone, il sera très utile pour l'équipe de forage de connaître à l'avance la géologie, la profondeur de la nappe d'eau et la profondeur totale probable du forage. Les coupes de forage précédentes sont une source essentielle d'information pour connaître ces éléments, avant même de commencer à forer. Ce type d'information pourrait être important pour le choix du matériel de forage. Les coupes de forage peuvent être conservées ensemble dans un dossier, que l'on appelle *base de données*. En prenant soin de remplir, classer et conserver de bonnes coupes de forage, l'équipe de forage apparaîtra comme une équipe professionnelle et compétente auprès de ses clients.



Echantillons de sols

4.2 PRENDRE DES ÉCHANTILLONS DE SOL

La première étape pour faire une coupe de forage est de prendre des *échantillons représentatifs des sols (formations géologiques) traversés pendant le forage du trou*. L'échantillon doit être un morceau de sol provenant entièrement de la couche forée au moment de la prise d'échantillon (éviter de mélanger l'échantillon avec du sol venant d'autres couches !). Les échantillons doivent être prélevés tous les mètres et/ou chaque fois que le type de formation (sol) change. Les échantillons doivent être conservés dans des sachets plastiques (écrire la profondeur sur les sachets si les échantillons ne sont pas décrits immédiatement), et rangés correctement à l'écart du chantier. Ils doivent ensuite être renseignés et décrits sur la coupe de forage (voir l'annexe C), avec la profondeur à laquelle l'échantillon de sol a été pris.

4.3 LES PROFONDEURS DE FORAGE

Dans les chapitres précédents, nous avons appris à installer la crépine dans une couche perméable (chapitre 1), si possible dans un aquifère situé sous une couche imperméable (chapitres 2 et 3).

La profondeur finale du forage est atteinte quand on a foré au moins 4 à 6 mètres dans une couche perméable de sable ou de gravier contenant de l'eau. Il est ensuite recommandé de forer *deux mètres supplémentaires* pour pouvoir installer un *décanteur* (voir les paragraphes 4.5 et 6.2) qui servira de *réservoir* aux particules qui se décantent dans le forage pendant la mise en place des tuyaux d'équipement (paragraphe 6.5).



Echantillon de sable grossier

4.4 COMMENT REMPLIR LES FICHES DE FORAGE ?

Etape 1

Décrivez les échantillons à chaque pause pendant le chantier de forage et écrivez leur profondeur, leur nom et leurs caractéristiques sur la fiche de coupe de forage (voir par. 1.3).

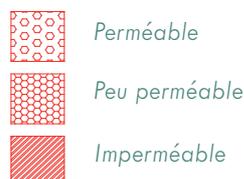
Etape 2

Ensuite, surtout pour ceux qui ne savent pas écrire, hachurez la colonne type de sol avec des hachures différentes pour les couches *perméables*, *peu perméables* et *imperméables*.

Coupe de forage				
Dessin	Profondeur (mètres)	Description du sol	dur / tendre fin / grossier	Couleur(s) de l'échantillon
Tuyau PVC	Remblai	Type de sol		
	1	Sable	fin	Jaune/brun
	2	Sable	fin	Jaune/brun
	3	Sable	fin	Jaune/brun
	4	Sable	fin	Jaune/brun
	5	Sable	fin	Jaune/brun
	6	Sable	fin	Jaune/brun
	7	Argile sableuse.....		Brun
	8	Argile sableuse.....		Brun
	8.5	Argile sableuse.....		Brun
	9	Argile	compact	Gris
	10	Argile	compact	Gris
	11	Argile	compact	Gris
	12	Argile	compact	Gris
	13	Argile	compact	Gris
	14	Argile	compact	Gris
	15	Sable	grossier	Jaune
	16	Sable	grossier	Jaune
	17	Sable	grossier	Jaune
	18	Sable	grossier	Jaune
	19	Sable	grossier	Jaune
	20	Sable	grossier	Jaune
	21	Sable	grossier	Jaune
	21.5	Sable	grossier	Jaune
	22	Argile sableuse.....		Jaune/brun
	23	Argile sableuse.....		Jaune/brun

Coupe de forage				
Dessin	Profondeur (mètres)	Description du sol	dur / tendre fin / grossier	Couleur(s) de l'échantillon
Tuyau PVC	Remblai	Type de sol		
	1	Sable	fin	Jaune/brun
	2	Sable	fin	Jaune/brun
	3	Sable	fin	Jaune/brun
	4	Sable	fin	Jaune/brun
	5	Sable	fin	Jaune/brun
	6	Sable	fin	Jaune/brun
	7	Argile sableuse.....		Brun
	8	Argile sableuse.....		Brun
	8.5	Argile sableuse.....		Brun
	9	Argile	compact	Gris
	10	Argile	compact	Gris
	11	Argile	compact	Gris
	12	Argile	compact	Gris
	13	Argile	compact	Gris
	14	Argile	compact	Gris
	15	Sable	grossier	Jaune
	16	Sable	grossier	Jaune
	17	Sable	grossier	Jaune
	18	Sable	grossier	Jaune
	19	Sable	grossier	Jaune
	20	Sable	grossier	Jaune
	21	Sable	grossier	Jaune
	21.5	Sable	grossier	Jaune
	22	Argile sableuse.....		Jaune/brun
	23	Argile sableuse.....		Jaune/brun

Grâce aux hachures, on distingue maintenant les couches *perméables*, *peu perméables* et *imperméables*. On peut par exemple utiliser les styles de hachure suivants :



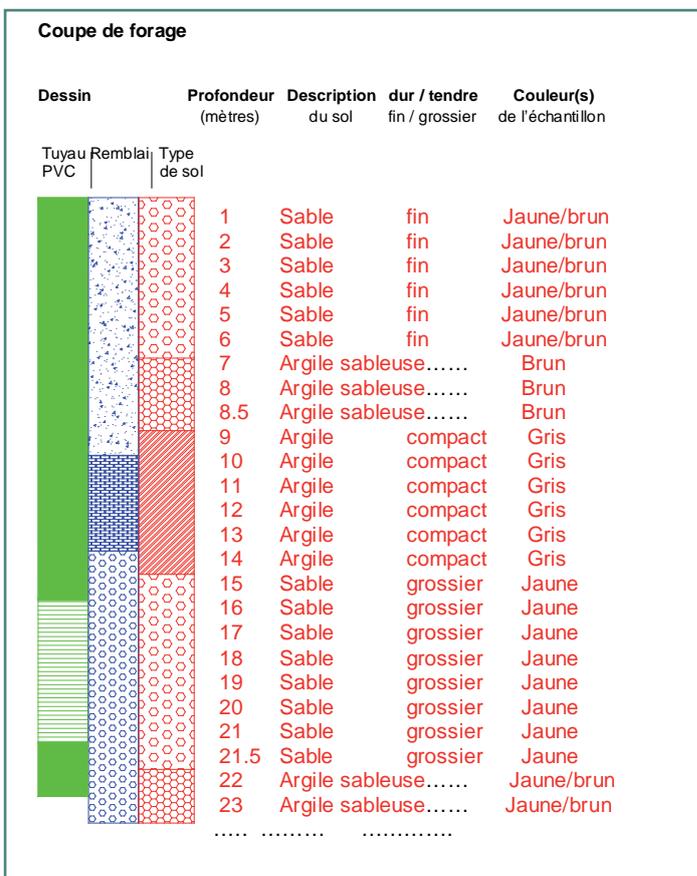
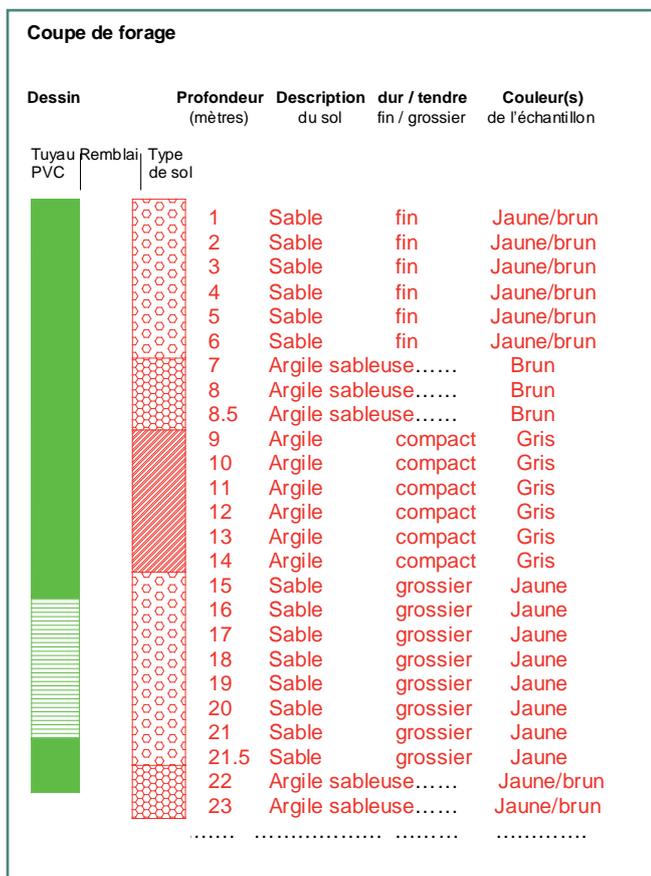
Supposons que le *niveau de la nappe** est à 5 mètres en-dessous du niveau du sol. Dans l'exemple ci-contre, nous pouvons voir un *second aquifère* entre 14 et 21,5 mètres.

Etape 3 :

Maintenant, on peut déterminer la longueur de la *crépine* et sa *profondeur*, en suivant les explications de la page suivante, dans le paragraphe 4.5.

Etape 4

Une fois la *crépine* et le tubage en PVC dessinés dans la première colonne, les profondeurs exactes du *remblai annulaire* (c'est-à-dire le *massif filtrant*, le *joint d'étanchéité sanitaire* et le *tout-venant*) peuvent également être dessinées sur le profil de forage.



Dans cet exemple, une *crépine* de 6 mètres a été installée entre 15 et 21 mètres en-dessous du niveau du sol. Un *décanteur* de 1,5 mètre de long a été ajouté au bout de la *crépine*.



Remarque : Ce profil de forage a été conçu pour pouvoir être rempli par des gens ne sachant pas forcément lire et écrire. Les dessins ont pour but de faciliter la visualisation des couches géologiques et les détails d'installation du forage.

! En utilisant le profil de forage et les dessins des différents types de sols (c'est-à-dire *perméables, peu perméables et imperméables*), il devient plus facile de déterminer l'emplacement exact de la crépine et du remblai annulaire.

Pour résumer : la coupe de forage se remplit en 4 étapes :

1. Décrire les échantillons de sol et leur profondeur
2. Indiquer les couches perméables et imperméables
3. Dessiner le tubage, la crépine et le décanteur dans la colonne "Tuyau PVC "
4. Dessiner les remblais et le(s) joint(s) d'étanchéité sanitaire dans la colonne "Remblai"

* Niveau de la nappe

Quand un forage est percé 'à sec', c'est-à-dire sans utiliser de fluide de forage, la profondeur de la nappe d'eau peut facilement être déterminée pendant le fonçage. Quand la nappe d'eau est atteinte ; le sol qui sort du trou de fonçage est humide.

Quand on utilise un fluide de forage (voir chapitre 5), le trou de forage est en permanence rempli d'eau pour maintenir la pression sur les parois du trou. Dans ce cas, il ne sera pas facile de connaître le niveau de la nappe dans le trou de forage. Il peut être utile de se faire indiquer par les gens des environs à quel niveau il est probable de trouver la nappe, ou de l'estimer en se servant du niveau statique d'un puits creusé à la main, d'un forage ou d'une rivière à proximité du chantier.

Dans une zone nouvelle pour l'équipe de forage, il est conseillé de foncer le premier forage aussi profond que possible (dans un bon aquifère), et de mesurer et enregistrer le niveau de l'eau après la construction du forage.

4.5 DÉTERMINER LA PROFONDEUR DE LA CRÉPINE ET DES REMBLAIS

Une fois la description des sols hachurée sur la coupe de forage, cette information peut être utilisée pour déterminer la profondeur exacte de la crépine et du remblai annulaire. L'explication qui suit est basée sur la coupe de forage montrée ci-dessus.

La profondeur et la longueur de la crépine

Pour les forages manuels, la longueur de la crépine n'excède en général pas 6 mètres. Les extrémités supérieures et inférieures d'un aquifère contiennent souvent des matériaux fins. Un aquifère peut également contenir de fines couches d'argile. Pour empêcher ces *particules fines* (qui pourraient causer des problèmes de turbidité ou endommager la pompe) d'entrer dans la crépine, il est important de ne PAS installer celle-ci au même niveau qu'elles. En d'autres termes, assurez-vous que la crépine est entièrement installée dans une *couche perméable* de sable ou de gravier ! Pour se faire, il est parfois nécessaire d'installer une crépine de moins de 6 mètres de long (mais elle ne doit en général pas faire moins de 3 mètres de long, voir paragraphe 6.2).

! Même si elles sont mesurées avec soin, les *profondeurs* des échantillons de sols peuvent ne pas toujours être exactes. Pour éviter que des *particules fines* ne rentrent dans le forage, il est recommandé d'installer la crépine et le remblai avec une marge de sécurité d'au moins 1 mètre. Dans la coupe de forage précédente, la crépine a été placée au milieu de l'aquifère, laissant ainsi une marge d'1 mètre de sable à chaque extrémité.

Le décanteur (ou tube de décantation, ou encore sabot de lavage)

Après l'installation et pendant l'utilisation du forage, des *particules de sol* peuvent entrer accidentellement dans la crépine. Les particules les plus grosses (qui peuvent endommager la pompe) se *décantent* au fond du forage par gravité. Pour empêcher une diminution de la surface crépinée, un *décanteur* de 1 à 2 mètres de longueur, avec un bouchon de fond, est attaché à la crépine (pour plus de détails sur le tuyau en PVC et la crépine, voir le paragraphe 6.2).

L'épaisseur du massif filtrant

Une fois la position de la crépine enregistrée (hachurée) sur la coupe de forage, on peut déterminer la position et l'épaisseur du *massif filtrant*. L'espace annulaire autour de la crépine est rempli avec du sable grossier ou du gravier fin calibré (*massif filtrant*), jusqu'à environ 1 à 2 mètres au-dessus de la crépine. Ces mètres supplémentaires sont nécessaires car pendant le développement du forage, le massif filtrant se compacte (se tasse). Il est donc recommandé d'ajouter une marge de sécurité d'au moins 1 à 2 mètres au-dessus de la crépine lors de l'installation du massif filtrant (pour plus de détails, voir le paragraphe 6.3).

L'épaisseur du joint d'étanchéité sanitaire

Quand on fore à travers une couche imperméable, il est recommandé de la *sceller* (refermer) avec de l'argile (bentonite) ou du ciment (paragraphe 3.3). Pour être sûr que cette couche est scellée correctement, l'épaisseur de ce *joint d'étanchéité* doit être d'au moins 3 à 5 mètres.

Si aucune couche imperméable n'a été traversée, et que le forage est par conséquent installé dans le premier aquifère, le *joint d'étanchéité* sanitaire devrait être installé directement au-dessus du *massif filtrant* (1 à 2 mètres au-dessus de la crépine) et devrait être épais d'au moins 5 mètres (pour les détails voir le paragraphe 6.4).

Les déblais (ou éléments d'excavation, ou encore cuttings)

Au-dessus du joint d'étanchéité sanitaire, on peut remblayer le trou de fonçage avec les *déblais* (le sol qui a été remonté à la surface au cours du forage).

Le joint d'étanchéité sanitaire de surface (ou cimentation de tête de forage)

Un autre joint d'étanchéité sanitaire de 3 à 5 m d'épaisseur doit être installé à partir de 3-5 m en dessous du niveau du sol jusqu'à la surface (pour plus de détails voir le paragraphe 6.5).

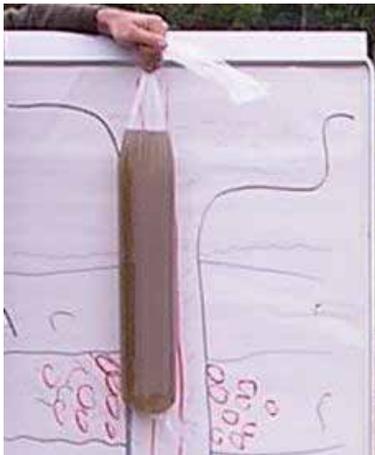


Equipe de forage remplissant la coupe de forage

5 LA PRESSION DE L'EAU ET LES FLUIDES DE FORAGE

5.1 FORER AVEC LA PRESSION DE L'EAU

Dans le paragraphe 1.2, nous avons vu diverses techniques de forage manuel. Une fois que le niveau de la nappe d'eau est atteint, certaines techniques comme la tarière et le forage par percussion utilisent un pré-tubage temporaire, pour éviter que le trou de forage ne s'effondre pendant le fonçage. Les autres techniques, comme le forage à la boue ou au rotary manuel, utilisent la pression de l'eau.



Un sachet rempli d'eau

Le pré-tubage

Il est facile de comprendre la fonction du pré-tubage qui empêche les parois du trou de s'effondrer. Le pré-tubage (tuyau) est résistant et agit comme un mur. Les matériaux des parois du forage ne peuvent pas passer à travers le pré-tubage. Cependant, le seul inconvénient est qu'il doit être ensuite enlevé (quand le tuyau d'équipement définitif est installé). Ceci peut être très difficile ou même devenir impossible quand un forage traverse une couche d'argile (le pré-tubage peut rester coincé dans l'argile collante).

La pression de l'eau

Tandis que le pré-tubage est résistant et dur, l'eau est quant à elle juste flasque et liquide. Alors, comment est-ce possible que l'eau puisse maintenir les parois d'un forage dans une couche de sable humide ?!

Pour répondre à cette question, regardons de plus près un exemple que nous connaissons tous ; un sachet d'eau.



Simulation de la pression de l'eau dans le 'trou de forage' (seau)

1. Remplissez un (long) sachet transparent avec de l'eau, par exemple l'un de ces sachets d'eau qui sont souvent vendus dans la rue (voir la photo). Serrer maintenant le bas du sachet entre votre pouce et vos doigts. Cela demande peu d'effort de presser le sachet vers l'intérieur. Puis, relâcher la pression sur le sachet. Comme vous pouvez le constater, le sachet reprend immédiatement sa forme initiale. Que s'est-il passé ?

Le poids de l'eau dans le haut du sachet a poussé le plastique à retrouver sa forme initiale. Ce que vous venez de sentir est la pression de l'eau.

2. Placez maintenant le sachet au milieu d'un seau rempli de sable très humide jusqu'au tiers de la hauteur du sachet (de manière à ce que les deux tiers du sachet émergent au-dessus du sable). Versez de l'eau dans le seau jusqu'au niveau du sable. Le sable humide dans le seau représente l'aquifère. Le trou et le sachet en plastique simulent le trou du forage. Que se passe-t-il ?

Le poids de l'eau de la partie haute du sachet pousse les côtés du plastique. A cause de cette pression, le sachet conserve sa forme et retient le sable dans le seau grâce à la pression de l'eau.

3. Coupez ensuite le sachet en plastique avec une paire de ciseaux, au même niveau que celui de l'eau dans le sable. Vous constaterez que le forage s'effondre. Que s'est-il passé ?

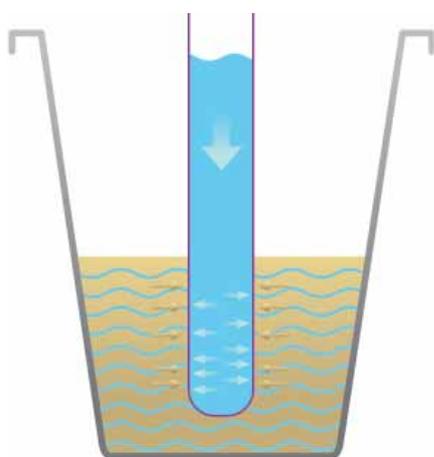
En coupant le sachet, le poids de l'eau de sa partie supérieure, et donc la pression de l'eau sur le sachet en plastique, a été supprimé. Le niveau de l'eau dans le sachet est maintenant le même que celui dans le seau. Il n'y a plus de pression de l'eau.



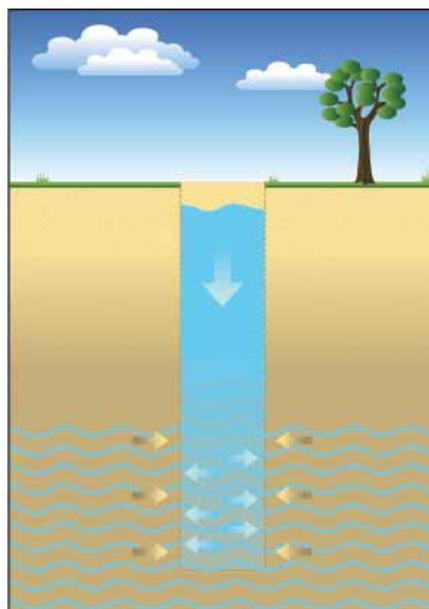
Effondrement du 'trou de forage' (seau)

Le trou de forage

Nous avons vu comment garder un trou de forage 'ouvert' dans du sable humide, quand le sable était dans un seau. Mais comment cela marche-t-il dans un vrai forage ?



Coupe transversale du seau



Coupe transversale du trou de forage

Le dessin de gauche représente une coupe transversale du seau contenant le sable mouillé et le sachet en plastique. A droite, on voit une coupe transversale d'un vrai forage. Comparons notre 'mini' forage avec le vrai forage :

1. Le niveau de l'eau dans le seau correspond au niveau de la nappe dans notre forage.
2. La partie supérieure du sachet plastique, au dessus du niveau de l'eau, correspond à la partie du forage remplie d'eau, au dessus du niveau de la nappe (niveau statique de l'eau).
3. Le sable mouillé dans le seau représente la couche de sable de l'aquifère qui contient de l'eau.

En réalité, le sachet en plastique est absent dans notre vrai forage. Dans le seau nous avons vu que quand on coupe le sachet (la conséquence étant que les niveaux de l'eau dans le 'forage' et le seau s'égalisent), le 'trou de forage' s'effondre. En d'autres termes,

! Lorsque le niveau de l'eau dans notre forage s'abaisse et devient égal au niveau statique de la nappe, le trou du forage peut s'effondrer. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'on fore dans des couches de sable ou de gravier (matériaux non cohésifs). Pour éviter l'effondrement, il est nécessaire de garder le trou de forage rempli d'eau tout au long du fonçage et de la construction du forage.

Pour empêcher notre 'eau de travail' (l'eau dans la partie supérieure du forage) de s'infiltrer dans une couche de sable ou de gravier, il faut trouver un équivalent du sachet en plastique pour ne pas perdre notre *pression de l'eau* ! Pour cela, on utilise des *fluides de forage*.

5.2 LES FLUIDES ADDITIFS DE FORAGE

Quand on mélange un additif avec notre eau de travail (*fluide de forage*) et que l'on fait circuler ce fluide dans le trou de forage, ses parois sont *plâtrées*, comme avec de la peinture sur un mur. Ce 'plâtre temporaire' joue le même rôle que le sachet en plastique dans l'exemple du seau. Les additifs rendent également le fluide de forage plus visqueux (épais), et facilitent ainsi le transport des débris de sol vers la surface du forage.

Il existe plusieurs types d'additifs :

- La bentonite
- Les argiles naturelles
- Les polymères
- La bouse de vache fraîche
- Les fibres végétale (et autres solides)

La bentonite

La bentonite est une *argile naturelle* traitée, qui, quand on la mélange avec de l'eau, augmente sa viscosité. Dans la plupart des pays, la bentonite coûte cher.

Avantage : La bentonite fonctionne extrêmement bien.

Inconvénient : Une fois que la bentonite a plâtré sur les parois du trou de forage, il est *très* difficile de l'enlever, il faut utiliser des produits chimiques ou des pompes puissantes pendant le développement du forage. Si la bentonite n'est pas enlevée correctement, cela peut *gravement affecter le débit* du forage ! Il n'est donc PAS recommandé d'utiliser de la bentonite pour les forages manuels (à faible coût). Dans certains pays, son utilisation en tant qu'additif de fluide de forage n'est pas autorisée.

Les autres argiles naturelles

L'argile naturelle, trouvée pendant le fonçage, dans des termitières ou ailleurs, fonctionne comme la bentonite (en moins collant). L'argile naturelle est bon marché, mais a le même *inconvénient* que la bentonite : elle bouche l'aquifère.



Exemple de polymère biodégradable

Les polymères

Les *meilleurs* additifs pour l'eau de forage sont les polymères. Quand on les mélange avec l'eau, ils la rendent plus épaisse et la transforment en un fluide très *visqueux*. Les polymères naturels sont aussi utilisés comme stabilisateurs et épaississants dans l'industrie alimentaire.

Avantage : les polymères fonctionnent extrêmement bien et les polymères naturels sont *biodégradables*. En d'autres termes, ils disparaissent naturellement après un certain temps.

Inconvénients : Dans la plupart des pays, ils sont difficiles à trouver et assez chers. Bien que chers, les polymères sont recommandés pour le forage manuel. Des recherches complémentaires sur les polymères à faible coût vont être menées prochainement par l'éditeur de ce manuel.



Mélanger de la bouse de vache avec l'eau

La bouse de vache fraîche

Cela peut paraître sale, mais la bouse de vache fraîche présente de nombreux avantages similaires aux polymères naturels. Elle fonctionne très bien et est biodégradable. De plus, la bouse de vache fraîche est *facilement disponible* dans la plupart des pays et est *très bon marché*.

Il y a cependant une certaine réticence à utiliser de la bouse vache pour creuser des forages. La bouse de vache contient les *bactéries d'E-coli* (paragraphe 7.3). Les E-colis sont utilisées comme indicateur de contamination de l'eau par les matières fécales (bactéries provenant des excréta) et peuvent provoquer des maladies chez les humains.

Jusqu'à présent, des études ont montré que la bouse de vache (indiquée par les nitrates) et les bactéries E-coli disparaissent dans

les premières semaines suivant la construction d'un forage. Cependant, des recherches complémentaires sont nécessaires pour mieux connaître les conséquences sanitaires de l'utilisation de la bouse de vache. Il est en général recommandé de ne pas boire l'eau d'un forage venant d'être foré avec de la bouse de vache au cours de son

premier mois d'utilisation.

Avantage : La bouse de vache fonctionne extrêmement bien, elle est biodégradable, bon marché et facilement disponible.

Inconvénients : Elle contient des pathogènes d'origine animale. Il est recommandé de chlorer le forage après son développement et l'essai de débit. Des recherches complémentaires sur les conséquences sanitaires de l'utilisation de la bouse vache seront réalisées prochainement par l'éditeur de ce manuel.

Les fibres végétales et les autres solides

Pour augmenter l'efficacité des additifs dans les aquifères de sables grossiers ou de graviers, des fibres ou d'autres solides peuvent être mélangés avec le fluide de forage. Ces matériaux bloquent les pores des couches grossières et empêchent, de même que les additifs, la perte de l'eau par infiltration. Les fibres sont toutefois difficiles à enlever. L'utilisation de fibres n'est donc pas recommandée dans la 'zone de la crépine' du forage. La sciure de bois et les enveloppes de céréales sont des exemples typiques de fibres.

5.3 RETIRER LES ADDITIFS DU FORAGE

Une fois le fonçage et l'installation du tuyau d'équipement définitif du forage terminés, les fluides additifs doivent être enlevés afin de garantir un bon débit du forage. Ceci peut être fait par rinçage, en utilisant un piston ou par pompage ou dans le cadre d'une opération appelée développement du forage (chapitre 7).

6 LA CONSTRUCTION DU FORAGE

6.1 LA CONCEPTION DU FORAGE

La première et la plus importante étape pour la conception d'un bon forage est de remplir la coupe de forage (chapitre 4), pendant le chantier (Remarque : assurez-vous de décrire les échantillons de forage au moins à chaque 'pause', car les échantillons peuvent être facilement perdus ou transformés en de jolies petites poupées d'argiles par des enfants qui jouent). A partir de la coupe de forage, on peut déterminer précisément la profondeur et la longueur de la crépine ainsi que la profondeur et l'épaisseur du massif filtrant et du joint d'étanchéité sanitaire (paragraphe 4.5).

Le diamètre du trou de forage

Le diamètre interne du tuyau d'équipement en PVC est choisi de manière à pouvoir contenir le diamètre externe de la pompe que l'on va installer à l'intérieur. Le diamètre du trou de forage est à son tour choisi en fonction du diamètre externe du tubage en PVC (paragraphe 6.2).

Pour le diamètre du trou de forage, il est important de considérer l'aspect suivant :

Le diamètre du trou de forage doit être au moins 2 pouces (50 mm) plus grand que le diamètre extérieur du tubage en PVC, de manière à pouvoir installer le massif filtrant et le joint d'étanchéité sanitaire.

Si cette règle n'est pas appliquée, et que l'espace annulaire entre le tuyau en PVC et les parois du trou est trop étroit, il sera presque impossible de placer le massif filtrant et le joint d'étanchéité sanitaire à la bonne profondeur. De plus, le remblai peut rester 'coincé' à une certaine hauteur (on appelle cela un 'pontage') et finir au mauvais endroit.

La profondeur du forage

Quand la profondeur finale du bas de la crépine du forage dans l'aquifère est atteinte, il faut encore forer deux mètres supplémentaires (paragraphe 4.3). Cela permettra aux fines particules de sol en suspension dans le forage (mélangées dans l'eau) de décanter avant et pendant l'installation de la crépine et du tuyau d'équipement (en faisant cela, on peut être sûre que la crépine sera installée à la profondeur déterminée grâce à la coupe de forage), et d'installer un décanteur (paragraphe 4.5).

La finalisation du forage

Enfin, avant de remonter les outils de fonçage à la surface, un forage réalisé avec un fluide doit être rincé avec de l'eau propre afin d'enlever toutes les particules fines qui sont en suspension dans le trou. Si cela n'est pas fait, ces particules vont se décanter au fond du trou de forage (et donc influencer la profondeur d'installation finale) ou entrer dans la crépine pendant l'équipement du forage, commençant ainsi déjà à remplir le décanteur (paragraphe 4.5 et 6.2).



Une corde avec des nœuds à intervalles réguliers de 1 mètre

Les instruments de mesure

Avant de commencer la construction du forage à proprement parler (paragraphe 6.5), il est important de vérifier la profondeur finale du trou de forage avec un instrument de mesure. Parfois, les trains de tiges utilisés pour le fonçage (qui sont utilisés pour évaluer la profondeur pendant le fonçage) sont de longueurs différentes, ou il peut y avoir confusion entre les membres de l'équipe sur le nombre de tiges déjà dans le sol. Pour ce dernier aspect, il est important de compter toutes vos tiges au début du chantier. Mais les mesures de profondeur doivent toujours être faites avec un mètre (décamètre) ou un instrument de mesure conçu spécialement à cet effet.

Un instrument de mesure bon marché et précis est facile à fabriquer. On attache un morceau de 1 mètre de barre à béton, plié en boucle, à un long morceau de corde de 4 mm de diamètre. Des nœuds sont faits sur la corde à intervalles réguliers de 1 mètre. La profondeur finale du forage ou celle du remblai peut être mesurée en comptant les nœuds.

6.2 MATÉRIAUX: TUYAU D'ÉQUIPEMENT ET CRÉPINES EN PVC

Dans la plupart des pays, il existe différents types de tuyaux en PVC, allant des tuyaux d'assainissement (évacuation) bon marché à des tuyaux pression et des crépines fendues de grande qualité mais chers. Selon l'usage qui sera fait du forage, vous pouvez choisir différents types de tuyaux. Trois exemples :

1. Pour un forage peu profond pour l'irrigation, équipé d'une pompe à pédales, un tuyau évacuation bon marché de 50 mm, dans lequel on scie les fentes soi-même, sera suffisant. Dans ce cas le diamètre du forage peut être faible (mais suffisant pour contenir le tuyau d'aspiration de la pompe à pédales), et la qualité de l'eau d'irrigation n'est pas très importante (forage peu profond, premier aquifère). Ce forage sera *bon marché* pour l'agriculteur.
2. Pour un forage d'eau potable, équipé avec une pompe à corde ou une autre pompe manuelle à faible coût, et qui sera utilisé par une seule ou quelques familles seulement, un trou plus profond sera préférable (pour protéger la qualité, il serait donc mieux de forer jusqu'au deuxième aquifère). Dans ce cas, on peut utiliser un tuyau en PVC de 90 à 110 mm, dans lequel on scie les fentes soi-même (pas de débit de pointe requis). En faisant cela, le forage sera plus *abordable* pour les usagers.
3. Dans de gros projets (pour le Gouvernement ou pour des ONG) de forages communautaires pour l'eau potable, équipés avec des pompes India Mark ou Afridev, il est également nécessaire de forer plus profond. Il est aussi souvent demandé d'utiliser des tuyaux standards en PVC, de 110 ou 125 mm de diamètre, et des tuyaux crépinés en usine (pour avoir un débit maximum, assurer une très bonne qualité de construction du forage, et pour pouvoir installer la pompe correctement). Ces forages seront nettement plus *chers*, mais de meilleure qualité.

Comme ces exemples le montrent, le choix des tuyaux dépend :

- Du diamètre externe de la pompe (la pompe doit pouvoir rentrer dans le diamètre interne du tuyau d'équipement)
- Du type de forage (irrigation ou eau potable)
- Du nombre d'utilisateurs (famille ou village)
- Du budget des usagers (bon marché ou cher)

Le diamètre et l'épaisseur des tuyaux

Il existe deux principaux standards reconnus internationalement pour la taille des tuyaux : les systèmes *métrique* (en mètres) et *anglais* (en pouces). Cependant, dans chaque pays la taille réelle en millimètres est différente de la taille donnée en pouces par l'usine. A titre indicatif, vous pouvez utiliser le tableau ci-contre.

Dimension nominale en inch.	Système métrique		Système anglais	
	Diamètre extérieur (mm)	Diamètre intérieur (mm)	Diamètre extérieur (mm)	Diamètre intérieur (mm)
1 ^{1/2} "	40	33	48,1	40
2"	63	55	60,2	52
2 ^{1/2} "	75	65	75	65
3"	90	80	88,7	78
4"	110	98	114,1	102
5"	125	116	140	130
6"	160	148	168	154
8"	225	210	219	204

! Important : l'épaisseur des parois des tuyaux de tubage doit toujours être supérieure à 3 mm. Si on utilise une paroi plus fine dans des forages profonds, les tuyaux pourraient se casser facilement.



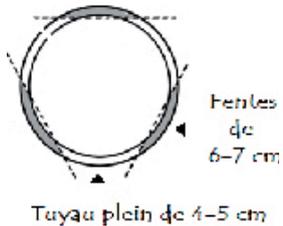
Un tuyau crépiné en usine



Un tuyau crépiné artisanalement

Les fentes de la crépine

Les fentes sont les ouvertures dans la crépine qui permettent à l'eau de pénétrer dans le forage. En théorie, la taille des fentes (leur largeur) doit être plus petite que la taille moyenne des particules du sol. Toutefois, dans certains pays il n'existe qu'une seule taille standard de fente (1 mm). Pour des forages à faible coût, il est possible de faire les fentes soi-même en utilisant une scie (voir ci-dessous).



Pour une crépine de 100 mm, on dessine sur toute la longueur du tuyau 6 lignes parallèles, distantes entre elles d'environ 4-5 et 6-7 cm (voir le dessin). On scie les fentes entre les lignes distantes de 6-7 cm (voir la photographie). La distance entre chaque fente devrait être d'environ 1 cm (la distance entre les fentes et les lignes parallèles dépend de l'épaisseur des parois du tuyau, pour éviter qu'il ne se casse).

Le décanteur



Bouchon du tube de décantation

Pour augmenter la durée de vie du forage, il est recommandé d'attacher en bas de la crépine un décanteur de 1 mètre de long, dans lequel les particules de l'aquifère rentrant dans le forage pourront décanter, sans bloquer la crépine ni la pompe (paragraphe 4.5). Le décanteur consiste simplement en un tuyau plein en PVC d'1 mètre, fermé à son extrémité inférieure. Pour fermer le bout du décanteur, on peut utiliser un bouchon fait en usine, en bois ou en PVC. Sinon, on peut également fermer le bout du décanteur en le coupant et en le pliant. Faites 4 entailles dans la partie inférieure du décanteur et chauffez-les. Pliez les 4 parties vers l'intérieur et laissez-les refroidir (voir la photographie). Vous pouvez également couper 6 à 8 morceaux triangulaires, puis plier les parties restantes en forme de pointe. Le fait de réaliser une pointe réduit le risque de frottement contre les parois du trou lorsque le tuyau d'équipement définitif est descendu dans le trou. Pour sceller complètement le bas du décanteur, versez 10 cm de mortier à l'intérieur.



L'assemblage des tuyaux

L'assemblage des tuyaux

En général, la plupart des tuyaux sont raccordés et collés par un système d'emboîtement male-femelle. Les tuyaux haut de gamme avec une épaisseur de paroi d'au moins 5 mm sont généralement filetés. Quand les tuyaux sont assemblés par collage, il est très important de bien nettoyer et de poncer l'extrémité male (*extérieur*) et l'extrémité femelle (*intérieur*) avant d'étaler la colle. Puis, étalez une *importante quantité de colle* sur les 2 extrémités et emboîtez les tuyaux rapidement l'un dans l'autre.

! La longueur réelle des tuyaux

Soyez conscient que les *emboîtements male-femelle* et les *filetages* influencent la longueur totale du tuyau. En d'autres termes, un tuyau de 6 mètres se réduira à 5,80 mètres, une fois collé à un autre tuyau. Quand on installe des tuyaux dans un forage de 30 mètres de profondeur, on peut ainsi créer une différence de plus d'un mètre, ce qui peut changer la position réelle de la crépine.



Le calibrage du massif filtrant

6.3 MATÉRIAUX : LE MASSIF FILTRANT

Le massif filtrant remplit l'espace entre l'aquifère (les particules de sable) et la crépine (empêchant ainsi les parois du forage de s'écraser contre la crépine) et sert à filtrer les fines particules de sable pour les empêcher de pénétrer dans le forage (paragraphe 4.5). Le gravier doit avoir une certaine taille (en général entre 1,5 et 3 mm), légèrement plus grande que la taille des fentes de la crépine, mais pas plus que deux à trois fois plus grande. Le gravier de la bonne taille ressemble plus à du sable assez grossier qu'à du gravier. Les grains sont meilleurs quand ils sont arrondis. De tels matériaux se trouvent souvent dans le lit des rivières ou sur les rives d'un lac. La meilleure manière de préparer un bon massif filtrant est de le *tamiser* aux tailles *maximum* et *minimum* (les grains trop petits ou trop grands sont ainsi éliminés).



Bentonite pellets



Sac de ciment

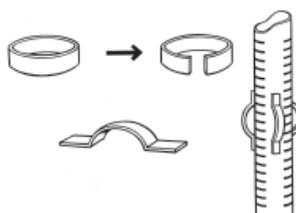
6.4 MATÉRIAUX : LE JOINT D'ÉTANCHÉITÉ SANITAIRE

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3 (paragraphe 3.3), il est essentiel d'installer un joint d'étanchéité sanitaire si l'on veut que le forage donne de l'eau de bonne qualité (paragraphe 4.5). Le joint d'étanchéité sanitaire est fait en ciment ou avec des boulettes de bentonite (le volume des boulettes de bentonite augmente beaucoup quand elles sont humidifiées, et elles scellent ainsi le trou par expansion). Des argiles naturelles gonflantes peuvent également être utilisées, mais elles sont plus difficiles à utiliser que la bentonite traitée. Dans de nombreux pays, les boulettes de bentonite sont chères. Dans ce cas, il est recommandé d'utiliser un mélange d'eau et de ciment (mortier de ciment).

Mélangez l'eau et le ciment jusqu'à obtention d'une pâte épaisse (26 litres d'eau pour un sac de 50 kg de ciment fera environ 33 litres de mortier). Si vous utilisez du mortier pour faire le joint d'étanchéité sanitaire, installez d'abord un demi-mètre d'argile au-dessus du massif filtrant pour empêcher le mortier de pénétrer dans le gravier.

6.5 LA CONSTRUCTION DU FORAGE

! Remarque : Les forages réalisés avec des fluides doivent rester remplis d'eau tout au long de leur équipement !



Centreurs artisanaux attachés à la crépine

Etape 1, Préparation

Préparez tous les matériaux dont vous avez besoin pour l'équipement et le remblayage. Mesurez la *longueur effective* des tuyaux PVC et coupez le dernier tuyau de façon à ce qu'il dépasse, après installation, d'au moins 1 mètre au dessus du niveau du sol. Numérotez les tuyaux dans l'ordre d'installation.

! Centrage de la crépine

Pour empêcher les fentes de la crépine de se *boucher* avec de l'argile en *frottant* contre les parois du forage pendant son installation, la crépine doit être *centrée*. Centrer la crépine dans le forage permet aussi au massif filtrant d'être bien installé et compacté, avec au moins 1 pouce (25 mm) de gravier tout autour de la crépine. Pour la centrer, on attache des *centreurs* tous les 3 mètres autour de la crépine. Les centreurs peuvent être faits avec des anneaux

de PVC, que l'on peut attacher sur 4 côtés, autour de la crépine (voir la photographie).

Etape 2, Installation des tuyaux en PVC

Une méthode pratique pour descendre les tuyaux en PVC dans le trou de forage est d'utiliser une corde (voir la photographie). Un bout de la corde est attaché au trépied de forage et l'autre bout est enroulé trois fois autour du tuyau pour former un nœud coulissant. On utilise la corde pour empêcher le tuyau et la crépine de glisser dans le trou de forage pendant que l'on ajoute un nouveau tuyau. Installez tous les tuyaux que vous avez préparés, et laissez 1 mètre de tuyau au-dessus du niveau du sol (voir étape 1) pour que la crépine soit placée à la bonne profondeur.



Utilisation d'une corde pendant l'équipement d'un forage

Etape 3, Nettoyage et rinçage de la crépine

Si l'on a utilisé des fluides de forage, les tuyaux et la crépine doivent être rincés une fois qu'ils ont été installés à la bonne profondeur. Versez de l'eau propre dans les tuyaux en PVC et laissez l'eau sale déborder du trou de forage. Si l'eau entre dans le forage lentement (ou pas du tout), cela peut indiquer que les fentes de la crépine sont bloquées par de l'argile ou de fines particules de sol venant des parois du forage. Il faut alors ajouter de la pression supplémentaire dans le tubage et la crépine en utilisant un piston (ou simplement une boule de chiffons), que l'on actionne de haut en bas et de bas en haut dans le tuyau d'équipement. Répétez cette opération jusqu'à ce que l'eau coule directement quand vous en ajoutez. Continuez à rincer avec de l'eau claire jusqu'à ce que l'eau qui sort du forage soit propre. C'est seulement à ce moment là que vous pouvez installer le massif filtrant.



Rinçage du forage à l'eau

Etape 4, Installation du massif filtrant

Versez le massif filtrant dans l'espace annulaire autour du tuyau. En même temps, secouez le tubage horizontalement pour faciliter la descente du gravier jusqu'à la crépine. Versez le gravier doucement, pour éviter les pontages (des ponts de gravier qui se coincent au mauvais endroit). Utilisez un mètre ou un outil pour mesurer la profondeur de la couche de gravier, et remplissez l'espace annulaire jusqu'à 1 à 2 mètres au-dessus du niveau de la crépine (paragraphe 4.5). Dans les forages réalisés avec des fluides, l'eau va déborder du tuyau en PVC quand le gravier est versé autour de la crépine. L'eau cessera de déborder quand toute la longueur de la crépine aura été remblayée.



En versant le gravier dans le trou de forage, l'eau déborde du tubage



Le remblayage est terminé. Le haut du tuyau est protégé.

avec un mortier de ciment.

Etape 5, Installation du joint d'étanchéité sanitaire

Quand le massif filtrant est descendu à la bonne profondeur (vérifiez toujours en mesurant !), le joint d'étanchéité sanitaire peut être installé (paragraphe 6.4). Préparez le mortier de ciment, l'argile gonflante naturelle ou la bentonite et versez le dans l'espace annulaire de la même manière (si vous utilisez du mortier pour le joint d'étanchéité sanitaire, rappelez-vous bien d'utiliser de l'argile pour le premier demi-mètre au-dessus du massif filtrant !) Mesurez régulièrement pour vous assurer que le joint d'étanchéité sanitaire est installé à *la bonne profondeur*.

Etape 6, Remblayer l'espace annulaire

En fonction des normes de chaque pays (voir l'annexe A), le reste de l'espace annulaire est rempli avec du tout venant ou du ciment (voir ci-dessous). Versez toujours le matériau lentement, en secouant le tubage de manière à éviter les pontages.

Etape 7, Installation du joint de surface (cimentation de la tête de forage)

Un joint d'étanchéité sanitaire de surface de 3 à 5 m d'épaisseur doit être installé à partir de 3 à 5 m en dessous de la surface du sol. Le joint de surface est en général fait

Etape 8, Le développement du forage

Voir le chapitre 7.

Etape 9, Construction de l'aménagement de surface et choix de la pompe manuelle.

Voir le chapitre 8. Remarque : Si le forage est laissé tel quel avant l'installation de la pompe, le haut du tubage en PVC doit être protégé (fermé, car les enfants jettent souvent des pierres dans le forage pour entendre le bruit de l'eau).

7 LE DÉVELOPPEMENT DU FORAGE ET LES ESSAIS DE DÉBIT

7.1 LE DÉVELOPPEMENT DU FORAGE

Le 'développement du forage' est nécessaire pour maximiser la productivité du forage et optimiser la capacité de filtration du massif filtrant. On y parvient en *enlevant les particules fines et les additifs de fluide de forage*, et en *compactant le massif filtrant*.

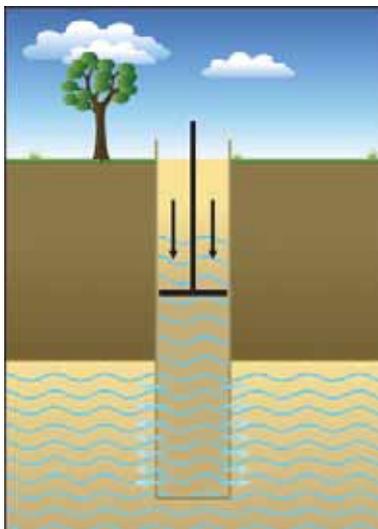
Après le forage, certaines *particules fines* et des *additifs de fluide de forage* restent coincés autour des parois du trou du forage et bloquent les pores de l'aquifère et du massif filtrant qui l'entourent (paragraphe 5.2). Après les avoir enlevés en développant le forage, l'eau pourra circuler librement de l'aquifère vers la crépine. Au cours du développement, le massif filtrant va également se compacter, de manière à ce qu'il ne contienne pas de gros vides (trous) dans lesquels les matériaux de l'aquifère (sable) pourraient ensuite s'infiltrer. Le massif compacté filtrera certaines des particules fines de l'aquifère. Le développement du forage a déjà commencé dans l'étape 3 de l'opération d'équipement : le rinçage de la crépine et du trou de forage a déjà permis d'enlever certaines des particules fines et des additifs du fluide de forage. Cependant, ce premier développement n'est en général pas suffisant, et il est nécessaire de réellement développer le forage après avoir terminé son équipement. Le reste du développement se fait après le remblayage, l'installation et le durcissement du joint d'étanchéité de surface (cimentation de la tête de forage) (ce durcissement prend au moins 24 heures).

Il existe plusieurs techniques pour développer les forages, et on les utilise parfois même en combinaison pour obtenir de meilleurs résultats. Ces techniques sont :

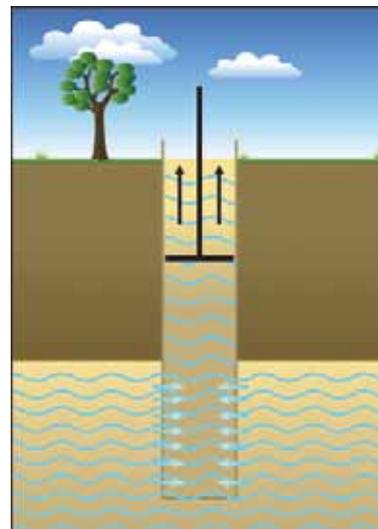
- Le piston
- Le pompage discontinu (cycles de pompage)
- Le pompage continu à gros débit

Le développement au piston

En créant des '*ondes de choc*' à travers le massif filtrant avec un *piston*, les particules fines et les additifs de fluide de forage sont décollés de la crépine, du massif filtrant et l'aquifère qui les entourent et les vides dans le massif filtrant disparaissent. L'eau contenant ces particules fines doit ensuite être pompée hors du forage. Un piston consiste en un jeu de disques en bois avec des rondelles en caoutchouc, ou d'un joint flexible plat (fait par exemple, avec un morceau épais de caoutchouc). Un piston doit épouser les parois du tubage en PVC. Plongez-le tout d'abord *sous le niveau de l'eau* dans le forage. Ensuite, actionnez-le de haut en bas pour que l'eau soit forcée d'entrer et de sortir de l'aquifère (*ondes de choc*), lavant ainsi l'aquifère et le massif filtrant en décollant les particules fines qu'ils contiennent (voir les schémas ci-dessous).



Descente du piston



Remontée du piston

Le piston doit être descendu doucement, pour ne pas forcer les particules fines et les additifs au fluide de forage à rentrer dans l'aquifère. Par contre, le piston doit être remonté brusquement, pour que les particules fines et les additifs au fluide de forage soient aspirés dans le tubage en PVC, où ils pourront être enlevés par pompage (voir ci-dessous).



Motopompe centrifuge

Le développement par pompage discontinu (cycles de pompage)

Après avoir utilisé le piston, on peut descendre une pompe au fond du forage pour enlever les particules fines qui ont été décollées et nettoyer le décanteur. Une fois que l'eau pompée est devenue claire, on peut à nouveau utiliser le piston. Répétez ce procédé jusqu'à ce que l'eau reste claire. Ensuite, installez la pompe juste *au-dessus* de la crépine, et commencez le pompage discontinu. Le pompage discontinu (pompage-arrêt) consiste à faire fonctionner la pompe pendant 5 minutes puis à l'arrêter pendant 2 minutes. Une fois que l'eau devient plus claire, vous pouvez laisser la pompe fonctionner jusqu'à ce que l'eau soit parfaitement claire. Si vous utilisez une pompe électrique ou une motopompe, il est recommandé de pomper au moins 2 à 3 fois le débit d'exploitation du forage (à moins que le forage ne s'assèche). Si vous utilisez une pompe manuelle, essayez de créer un débit maximal, jusqu'à ce que l'eau soit claire (merci de consulter l'annexe A pour des normes de forage spécifiques à votre pays).



Développement manuel

Les pompes pour le développement d'un forage

Plusieurs types de pompes peuvent être utilisés pour développer un forage. Les meilleures options pour le développement sont les pompes immergées électriques et les compresseurs. Mais ces pompes sont chères. Il est recommandé d'utiliser ces pompes pour des forages d'eau communautaires, nécessitant des débits d'eau importants. Pour des forages familiaux, qui doivent souvent être faits à moindre coût pour être abordables, on peut utiliser des pompes manuelles pour le développement.

Les pompes électriques pour forages profonds (pompes immergées)

Une bonne option est d'utiliser une pompe immergée. On peut ainsi obtenir des débits importants. Il est cependant nécessaire d'avoir de l'électricité (probablement un groupe électrogène/générateur), et la pompe et le générateur sont chers.

Les compresseurs

Il en va de même pour les compresseurs. Les compresseurs sont des outils de développement très appropriés, avec lesquels on peut obtenir des débits très importants et des ondes de choc. Il faut néanmoins un gros compresseur, ce qui coûte cher.

Les motopompes centrifuges

Une option moins chère pour le développement, avec des débits relativement importants, est d'utiliser une motopompe centrifuge ou une pompe à boue. Cependant, ces pompes aspirantes de surface ne peuvent fonctionner que si le niveau dynamique de l'eau souterraine (le niveau de l'eau quand on pompe) est à moins de 7 mètres sous le niveau du sol.



Redéveloppement au compresseur

Les pompes manuelles

Bien qu'elles soient beaucoup moins efficaces pour le développement, on peut également utiliser des pompes manuelles (qui sont moins chères) pour les forages familiaux. Quand on utilise des pompes manuelles pour le développement des forages et qu'elles sont utilisées à leur débit maximal pendant une certaine période, jusqu'à ce que l'eau soit claire, elles peuvent être suffisantes.

Le 'redéveloppement'

Quand un forage a été utilisé pendant plusieurs années et que son rendement diminue, on peut essayer de le redévelopper. Redévelopper un forage se fait facilement, en utilisant la même procédure que celle décrite plus haut : avec un piston ou par *pompage discontinu*.

7.2 LES ESSAIS DE DÉBIT – LA PRODUCTIVITÉ DU FORAGE

Une fois qu'un forage a été développé et ne contient plus de particules fines, le *débit du forage* doit être testé. Les essais de débit donnent des informations utiles à la fois sur le forage et sur l'aquifère. Ils permettent notamment de savoir si la productivité du forage sera suffisante pour son usage.



Sonde piézométrique électrique

Remarque : des essais de débit fiables ne peuvent être faits que quand le niveau de l'eau est retourné à la normale après le développement du forage. Le forage doit être laissé au repos au moins 24 heures après son développement avant de commencer les essais de débit.

Il existe deux manières de tester la productivité du forage : vous pouvez utiliser soit une pompe électrique immergée ou une motopompe, soit une pompe manuelle.

La sonde piézométrique

Dans les deux cas, le niveau de l'eau doit être mesuré. Pour les essais de débit mécanisés, on peut utiliser une *sonde piézométrique* électrique (relativement chère), qui produit un signal électrique quand le niveau de l'eau est atteint (voir la photographie).

Pour le forage à faible coût avec des pompes manuelles, on peut utiliser un simple *décamètre* ou une *corde de mesure* faite soi-même.

Les essais de débit avec des motopompes ou des pompes immergées

Etape 1

Avant de commencer les essais de débit, il est très important de *mesurer le niveau de l'eau* dans le forage. Ce niveau est appelé *niveau statique*. Quand vous prenez les mesures, choisissez un point de référence fixe, par exemple le haut du tuyau d'équipement du forage.

Etape 2

Descendre la pompe immergée (ou le tuyau d'aspiration de la motopompe) jusqu'à une profondeur maximale de 1 mètre *au-dessus* de la crépine.

Etape 3

Commencez à pomper, tout d'abord à un *débit minimal* (par exemple 0,2 ou 0,5 m³/h). Contrôlez régulièrement (avec un seau et un chronomètre) et écrivez le débit tout en suivant l'évolution du niveau de l'eau pendant le pompage. Continuez à pomper au même débit jusqu'à ce que le niveau de l'eau se stabilise. Notez le *niveau de l'eau*, le *débit* et *l'heure*. La différence entre les niveaux *statique* de l'eau (avant le pompage), et le *niveau dynamique* de l'eau (tout au long du pompage) est appelé *rabattement*.

Etape 4

Augmentez le débit par étapes. A chaque fois que vous augmentez le débit, vous remarquerez peut-être que l'eau devient trouble, car des particules fines sont pompées hors du forage. N'augmentez le débit de pompage que quand l'eau est redevenue claire et que le niveau de l'eau s'est stabilisé. Notez le *niveau de l'eau*, le *débit* et *l'heure*.

Remarque : le niveau de l'eau ne doit jamais descendre en dessous du niveau de la crépine. Si le niveau de l'eau s'est stabilisé juste au-dessus du niveau de la crépine, le débit ne doit pas être à nouveau augmenté.

Etape 5

Augmentez le débit jusqu'au débit souhaité de la pompe à installer sur le forage. En moyenne, pour une pompe manuelle, le débit se situe autour de 1000-1500 litres par heure (1-1,5 m³/h). Pompez à ce débit pendant *plusieurs heures* jusqu'à ce que le niveau de l'eau dans le forage soit stable et que l'eau soit claire.

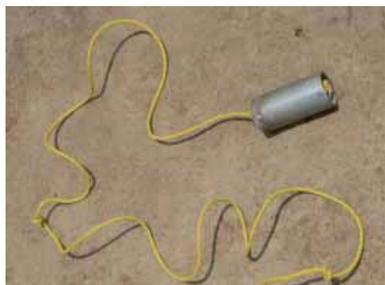
Dernière étape : conclusion

Si le niveau de l'eau se stabilise au-dessus du niveau de la crépine (le niveau de l'eau ne doit jamais descendre en dessous de ce niveau), le débit du forage est suffisant pour l'installation d'une pompe manuelle. Si le niveau de l'eau est descendu en dessous du niveau de la crépine (aux étapes 4 ou 5), alors il faut arrêter de pomper, laisser le niveau de l'eau remonter (attendez jusqu'à ce que le niveau de l'eau soit égal au niveau statique mesuré auparavant. Cela prendra entre quelques heures et un jour) et essayez de pomper à un débit plus faible. Quand seulement un faible débit (plus bas que le débit estimé de la pompe devant être installée) peut être maintenu, le forage n'est pas assez productif. Il faut alors décider avec le propriétaire (et parfois le bailleur) de la suite à donner à cet échec.

Les essais de débit avec des pompes manuelles

Etape 1

Avant de commencer à pomper, il est très important de *mesurer le niveau statique de l'eau* dans le forage. En mesurant, choisissez un point de référence fixe, par exemple le haut du tuyau d'équipement du forage. Un instrument de mesure peut être fabriqué pour mesurer le niveau de l'eau.



Instrument de mesure du niveau de l'eau

Instrument de mesure du niveau de l'eau

Prenez un morceau de tuyau galvanisé de $\frac{3}{4}$ de pouce de diamètre et 6 cm de long. Bouchez-en une extrémité en la soudant, et soudez un anneau de fixation au-dessus. Attachez-y une corde, avec un nœud tous les mètres (comme la corde de mesure utilisée pour vérifier la hauteur de remblayage). Bougez cet outil de haut en bas dans le forage. Quand le tuyau galvanisé touche le niveau de l'eau, on entend un bruit de 'plouf'. Comptez le nombre de nœuds pour connaître la profondeur.

Etape 2

Installez la pompe manuelle et pompez à débit constant (débit maximal) le plus longtemps possible. Demandez aux villageois / usagers de vous aider. Pompez à débit constant. Ne commencez pas trop fort, et ne vous arrêtez pas, même pas pour quelques minutes de pause. Continuez à pomper pendant 4 heures et mesurez le débit toutes les heures avec un seau et un chronomètre.

Etape 3

Ensuite, enlevez rapidement la pompe et suivez la remontée de l'eau souterraine en mesurant le niveau de l'eau toutes les 30 minutes. Plus le temps pour retrouver le niveau statique est court, meilleur est l'aquifère. Au cours de cet essai, notez le plus d'information possible (le niveau de l'eau au début et à la fin, les heures et les débits mesurés de temps en temps). Un formulaire simple d'essai de débit est joint en annexe D.

Etape finale : conclusion

Si la pompe n'a pas tourné à vide (sans eau) pendant le pompage et que le niveau de l'eau est revenu au niveau statique (mesuré avant l'essai) en moins de 6-12 heures, alors le débit du forage sera suffisant pour installer une pompe manuelle.

7.3 ANALYSER LA QUALITÉ DE L'EAU

L'eau de bonne qualité (potable) ne doit contenir ni pathogènes (bactéries provoquant des maladies, etc.) ni de quantités excessives (au-dessus des normes) d'éléments chimiques dangereux. Le goût et l'odeur doivent être acceptables, et l'eau doit être claire et incolore. Pour s'assurer que la qualité de l'eau est suffisante pour pouvoir la boire, l'eau doit être analysée.

Pour l'eau de boisson, de nombreux paramètres doivent être analysés. Voici quelques exemples de paramètres :

1. Les paramètres chimiques : la dureté (calcium, magnésium), pH (acidité), conductivité électrique (pour connaître la quantité de sels), fer, métaux lourds (cadmium, plomb, etc.), les nutriments (azote, phosphore), les produits chimiques artificiels (pesticides pour l'agriculture, hydrocarbures des carburants, etc.) et les produits chimiques naturels (chlorure, sodium, fluor, arsenic, etc.).
2. Les paramètres biologiques : les pathogènes (bactéries (E-coli), virus (hépatites), parasites (vers, amibes), etc.). Souvent, les bactéries E-coli sont analysées pour desceller les pollutions d'origines fécales (venant des latrines).
3. Les paramètres physiques : la turbidité, couleur, odeur, etc.

La plupart des analyses de qualité de l'eau doivent être réalisées en laboratoire, mais certaines peuvent être faites directement sur le terrain. Pour plus d'informations sur les analyses de qualité de l'eau et pour les réglementations spécifiques à votre pays, référez-vous à votre Ministère des Ressources en eau.

Prélever des échantillons représentatifs

Avant de prélever des échantillons, attendez au moins d'avoir complètement terminé le développement et les essais de débit. Il est même préférable d'attendre quelques semaines, pour permettre à certains produits issus du fluide de forage, de l'eau de travail ou du ciment de se disperser (diluer). Ne prenez pas un échantillon directement après la désinfection du forage car le résultat est prévisible (pas de pathogènes) et ne sera pas utile.

La désinfection du forage – la chloration

Après avoir terminé le forage, on peut le désinfecter afin de tuer les organismes dangereux (pathogènes) qui pourraient être entrés dans le forage avec l'eau de travail, le remblayage de l'espace annulaire ou la pompe, au cours des opérations d'installation. Un forage peut être désinfecté par chloration. Pour plus d'information sur la chloration, voir l'annexe E. Pour les réglementations spécifiques à votre pays, référez-vous au Ministère des Ressources en eau.

8 LA FINALISATION DU FORAGE

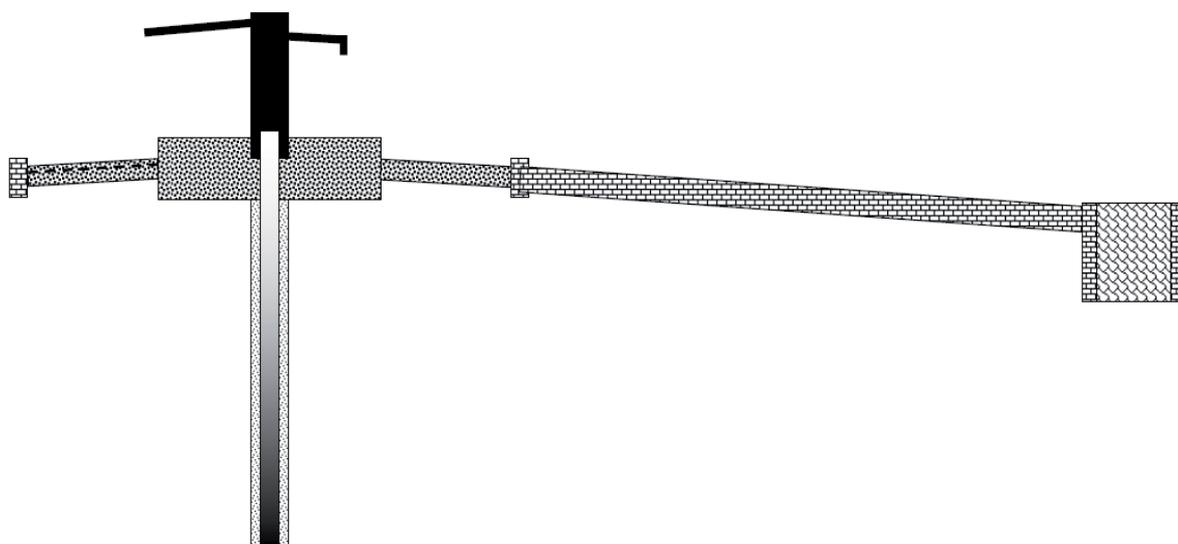
8.1 LA DALLE SANITAIRE EN BÉTON

Enfin (après les essais de débit), on doit installer l'infrastructure de surface et la dalle sanitaire. Cette dalle empêchera l'eau de la surface et les pollutions de s'infiltrer directement dans le forage. La dalle fournit également une base solide et propre pour la pompe manuelle et le pompage de l'eau. La dalle est en général de 2 à 3 mètres de diamètre avec un (petit) mur autour.

Il existe de nombreux modèles différents pour la dalle sanitaire, et le choix dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels : les normes nationales, le type de pompe à installer, le prix et le besoin de protection contre les inondations (dans certaines zones), etc. Enfin, il est important que les usagers soient satisfaits du type de dalle choisi. Une barrière peut être construite autour du forage pour garder les animaux éloignés et, dans certains endroits, pour contrôler l'accès au forage.

8.2 LE PUIS PERDU

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 3.1, il est important, pour des raisons d'hygiène, que la dalle sanitaire sèche régulièrement. En la séchant, la lumière du soleil va *désinfecter* les alentours du forage et tuer la plupart des *pathogènes*. Pour faciliter le séchage de la dalle, il est recommandé de la construire avec une légère pente. Un canal de drainage est également construit au point le plus bas de la dalle, pour éloigner l'eau du forage. L'eau ainsi drainée peut alors s'infiltrer dans ce que l'on appelle un puits perdu. Le puits perdu est en général construit à 4 à 6 mètres de distance du forage. La construction d'un puits perdu est simple. Il s'agit d'un trou de drainage de 1 × 1 × 1 mètre rempli de cailloux (gros graviers) et de pierres.



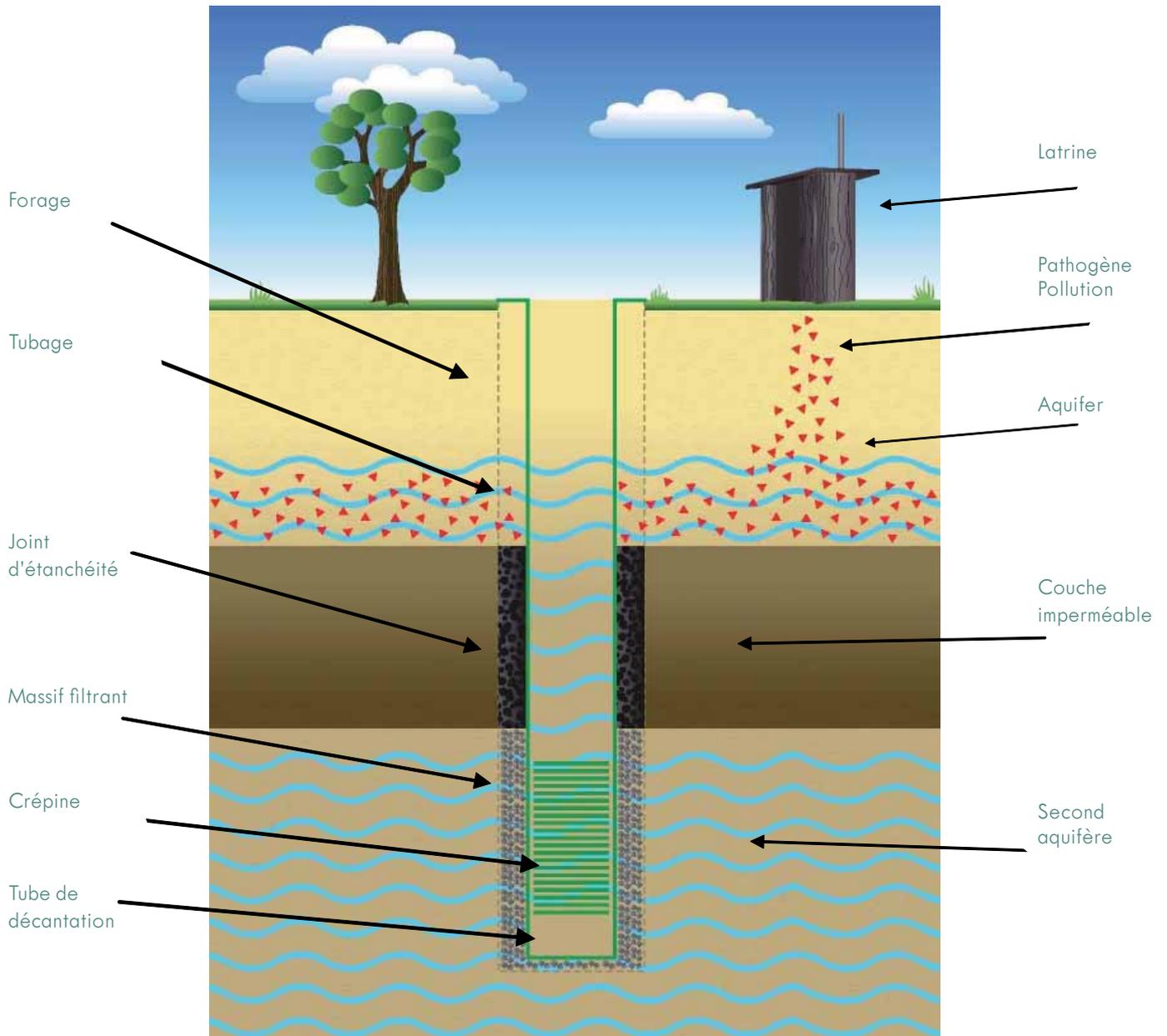
Coupe transversale d'un forage, de la dalle sanitaire en béton, du puits perdu et de la pompe manuelle

8.3 LE CHOIX DE LA POMPE

Il existe de nombreux types et modèles différents de bonnes pompes, mais le choix de celle qu'on va installer sur le forage est très important. Le choix de la pompe manuelle dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels : les normes nationales, la disponibilité des pièces détachées, la facilité de maintenance, le prix, la profondeur de la nappe d'eau et le pH de l'eau souterraine (voir le paragraphe 2.5)

Il peut être difficile de faire le bon choix, mais il existe d'autres manuels sur ce sujet. Les pompes manuelles ne sont donc pas incluses dans ce manuel.

GLOSSAIRE DES TERMES TECHNIQUES



Aquifère	Couche perméable contenant de l'eau (sous le niveau de la nappe).
Argile	Particules extrêmement fines, plus petites que 0,004 mm.
Bentonite	Argile naturelle traitée (argile gonflante).
Cohésif	Une caractéristique des particules qui sont collées ensemble.
Construction de forage	La construction (forage, équipement et remblai) d'un forage.
Couche d'argile	Couche de dépôts (sédiments) argileux.
Couche non consolidée	Couche faite de particules meubles comme l'argile, le limon, le sable et le gravier.
Couches sédimentaires particules.	Couches formées par l'érosion, le transport (par le vent ou les rivières) et le dépôt (sédiment) de
Coupe de forage	Archive écrite des formations (couches de sols et leurs caractéristiques) forées, selon la profondeur.
Crépine	Tuyau en PVC fendu par lequel l'eau d'un aquifère pénètre dans le forage.
Décanteur	1 à 2 mètres de tubage, fermé en bas, et fixé au bas de la crépine.
Dépôt	Sédiments.
Développement de forage	Retrait des particules fines et des additifs de fluide du forage et de l'aquifère l'entourant, et compaction du massif filtrant.
Eau de travail	Eau, avec ou sans fluide ajouté, utilisée pendant l'opération de fonçage.
Erosion	Décomposition des roches en petits morceaux au contact des conditions atmosphériques comme la chaleur, l'eau, le vent, la glace et la pression.
Forage	Puits foré pour accéder à l'eau souterraine.
Forage manuel	Forage réalisé avec des outils utilisant la force humaine.
Forage mécanisé	Forage réalisé avec des machines et outils mécanisés.
Formation géologique	Types de roches / couches sédimentaires sous la surface de la terre.
Géologie	L'étude de la terre (formation des roches et couches sédimentaires).
Graviers	Particules entre 2 et 64 mm de diamètre. Les particules entre 4 mm et 64 mm sont aussi appelées cailloux.
Hydrogéologie	L'étude de l'eau souterraine.
Imperméable	Matériau qui ne laisse pas passer l'eau.

Joint d'étanchéité sanitaire	Joint en bentonite ou ciment, placé dans l'espace annulaire entre le tubage et la formation (parois du forage) pour empêcher l'eau de mauvaise qualité de contaminer le forage.
Latérite	Formation dure des régions tropicales, contenant beaucoup de fer.
Limon que le sable.	Particules fines entre 0,004 mm et 0,063 mm de diamètre. Le limon est plus gros que l'argile et plus fin que le sable.
Massif filtrant	Sable grossier calibré placé autour de la crépine.
Nappe d'eau	La surface supérieure de l'eau souterraine (nappe d'eau souterraine).
Niveau statique de l'eau	Niveau de la nappe d'eau souterraine, mesuré avant de commencer à pomper.
Pathogènes	Agent infectieux pouvant provoquer des maladies (bactéries, virus, parasites).
Perméabilité	Une mesure de la capacité d'un matériau à se laisser traverser par l'eau.
Perméable	Matériau qui laisse l'eau passer facilement à travers ses pores.
Productivité du forage	Le volume d'eau produit par le forage (généralement mesuré en m ³ /jour ou litre/seconde).
Polluant	Pollution.
Qualité de l'eau	Terme distinguant l'eau pouvant être bue ou pas (polluée ou pas).
Remblai annulaire	Les matériaux (gravier, joint d'étanchéité sanitaire et remblai) placés dans l'espace entre la crépine et le tubage) et les parois du sol.
Roche consolidée	Particules (comme le sable, l'argile ou le gravier) 'cimentées entre elles' pour former une roche.
Roche éruptive	Roche formée lors du refroidissement de matériaux en fusion.
Sable	Particules entre 0,063 mm et 2 mm de diamètre. Sable très grossier : 1 – 2 mm Sable grossier : 0,5 – 1 mm Sable moyen : 0,25 – 0,5 mm Sable fin : 0,125 – 0,25 mm Sable très fin : 0,063 – 0,125 mm
Tuyaux d'équipement	Tuyau en PVC, à parois pleines, pour construire les forages.
Viscosité	Mesure de l'"épaisseur" d'un fluide.

RÉFÉRENCES

Bibliographie :

Drilled Wells, Peter Ball, SKAT Switzerland, 2001

Groundwater and Wells, F.G. Driscoll, Johnson Screens US, 1986

Developing Groundwater, Alan Mac Donald, Jeff Davies, Roger Calow, John Chilton, ITDG publishing, United Kingdom, 2005

Technical notes on Well Construction, internet, Lifewater Canada

Simple drilling methods, Bob Elson and Rod Shaw, WEDC United Kingdom

Hydrogeology I, A. Dassargues, Leuven University Belgium, 1998

Hand augered garden wells, Jonathan Naugle, Lutherean World Relief Niger, 1996

Borehole and hand pump implementation, Connect International Netherlands, 2004

Feedback

Ce manuel est basé sur l'expérience développée avec diverses ONG locales et micro-entreprises de forage manuel, formées et/ou évaluées dans le cadre de projets en Tanzanie, au Tchad, Ghana, Sénégal, Ethiopie, Madagascar, Inde et Nicaragua. Le contenu de ce manuel peut être utilisé comme un guide au cours de sessions de formation (y compris des sessions de formation organisées par des formateurs locaux) et comme un ouvrage de référence pour les superviseurs de forage, ONG, équipes et entreprises de forage manuel tout au long des opérations de fonçage et d'équipement de forages. Ce manuel traite de sujets essentiels comme la relation entre la géologie et la qualité sanitaire d'un forage, pour le forage manuel, dans un langage simple et compréhensible.

Nous souhaitons continuer à améliorer ce manuel. Nous apprécierions donc énormément de recevoir tout retour d'information ou suggestion pouvant nous permettre d'améliorer les éditions suivantes de ce manuel. Merci de les envoyer par e-mail à la Fondation PRACTICA : info@practicafoundation.nl

ANNEXES

- A Réglementations spécifiques au pays
- B Conditions géologiques spécifiques au pays
- C Coupe de forage
- D Formulaire d'essais de débit
- E Chloration