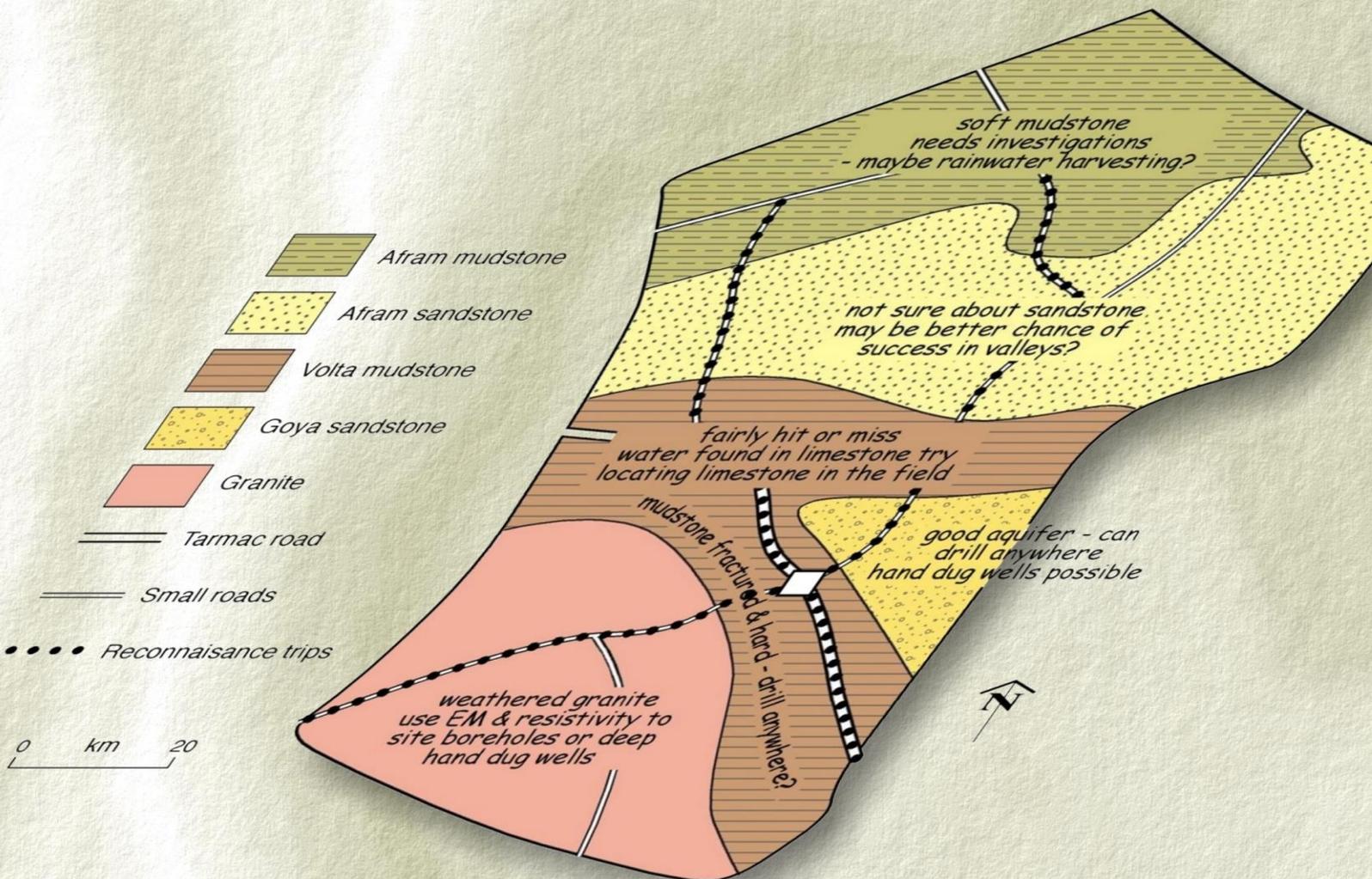


Implantation des forages

Guide à l'intention des chefs de projet



Résumé

La présente note pratique s'adresse aux responsables de programmes et de projets d'approvisionnement en eau. Elle propose un guide détaillé relatif à l'implantation de forages. Elle expose tout d'abord les principes fondamentaux pour l'élaboration d'un modèle hydrogéologique simple et fournit des explications de base visant à aider le lecteur à acquérir une meilleure compréhension de l'hydrogéologie.

Elle détaille ensuite les éléments à prendre en compte lors du choix du site de forage, à savoir les caractéristiques du forage et une liste complète d'instructions en vue de trouver le site le plus adapté. Sont également présentés les points clés du dossier d'appel d'offres et des documents contractuels, ainsi que des informations de base sur le travail de terrain et la gestion des contrats.

Cette note vise à accompagner le lecteur tout au long du processus, depuis la prise en compte des besoins de l'utilisateur final jusqu'à la sélection de l'entreprise qui construira le forage.

La présente publication fait partie d'une collection consacrée à la réalisation de forages publiée par le RWSN:

- Code de bonnes pratiques pour la réalisation de forages
- Développement de l'accès durable à l'eau souterraine: utilisation, protection, amélioration
- Analyse des coûts et détermination des prix
- Supervision des forages d'eau potable
- Passation de marchés et gestion des contrats de construction de forages

Consultable à l'adresse: <http://www-rural-water-supply.net>

Table des matières

Résumé	2
Glossaire	2
Introduction	3
1 Modèle conceptuel.....	4
2 Caractéristiques du forage.....	6
3 Détermination du site le plus adapté.....	7
4 Préparation de l'appel d'offres et des documents contractuels.....	12
5 Passation de marchés et attribution du contrat.....	13
6 Travail sur le terrain et gestion du contrat.....	14
7 Paiement, suivi et documentation.....	14
8 Conclusions et recommandations.....	14
Annexe 1 Modèle de catégorisation des risques et structures de paiement	15

Glossaire

Anthropique – qui est causé par l'homme

Aquifère – couche rocheuse souterraine dans laquelle est emmagasinée de l'eau que l'on peut extraire efficacement à l'aide d'un puits ou d'un forage.

Aquifère libre (également dénommé *nappe libre* ou *nappe phréatique*) - la nappe n'est pas séparée de la surface par une couche imperméable. En d'autres termes, la surface de la nappe correspond au niveau de la surface phréatique ou surface libre. En

dessous de cette surface, les pores de l'aquifère sont saturés alors qu'au-dessus, il y a la «zone vadose» ou zone non saturée. L'aquifère est donc en contact direct avec l'atmosphère (espaces poreux remplis d'air) via la zone non saturée.

Champ captant – groupe de forages permettant de couvrir d'importants besoins en eau (ville, système d'irrigation, camp de réfugiés).

Coefficient d'emmagasinement – volume d'eau qui peut être libéré de l'aquifère pour un abaissement donné du niveau d'eau.

Conductivité hydraulique (K) – taux d'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux (sol ou aquifère). La conductivité hydraulique se définit comme le volume d'écoulement par unité de surface d'un milieu poreux sous l'effet d'un gradient de pression. Les unités généralement utilisées sont $m^3/m^2/jour$ ou $m/jour$. On utilise parfois la perméabilité plutôt que la conductivité hydraulique, mais cette dernière se réfère à tous les fluides et pas seulement à l'eau.

Cône de rabattement – lorsque l'eau est pompée dans un puits ou forage, la surface de la nappe phréatique (dans le cas d'une nappe libre) ou le niveau piézométrique (dans le cas d'une nappe captive) autour du puits/forage s'abaisse. Cette zone est dénommée **cône de rabattement**. Le terrain situé directement au-dessus d'un cône de rabattement est dénommé **zone d'influence**.

Étude géophysique – mesure les propriétés physiques des roches (résistivité, conductivité, champs magnétiques et propriétés acoustiques). Les mesures sont interprétées en fonction des caractéristiques géologiques susceptibles de favoriser le stockage et la circulation des eaux souterraines.

Forage – point d'eau de petit diamètre obtenu par foration.

Formation rocheuse – ensemble identifiable formé de matériaux terrestres naturels. La formation peut être **meuble** (sable, gravier) ou **consolidée** (grès, granit).

Impacts environnementaux (dérogation) – impact du pompage d'un puits/forage sur le débit saisonnier des sources, le rabattement des niveaux piézométriques au niveau des points d'eau proches ou l'assèchement des zones humides.

Interférence – effet du pompage de l'eau d'un puits ou forage sur l'abaissement des puits/forages voisins.

Matériau imperméable – matériau tel que l'argile entravant la libre circulation de l'eau.

Nappe captive (ou aquifère captif) - eau souterraine confinée entre des couches d'argile ou de roche faiblement perméable limitant son écoulement d'une formation à l'autre. Une nappe captive n'est donc pas en contact direct avec l'air extérieur.

Nappe phréatique – Surface d'eau libre dans un aquifère libre.

Niveau piézométrique – niveau auquel l'eau d'un aquifère captif remonte dans un puits/forage. Dans une nappe libre, le niveau piézométrique correspond au niveau de la nappe phréatique.

Perméabilité – voir «conductivité hydraulique».

Puits – désigne soit un puits creusé à la main, soit, de façon plus générique, tout point de captage vertical des eaux souterraines autre qu'une source, quel que soit son diamètre et son mode de construction.

Rabattement d'une nappe d'eau souterraine – abaissement du niveau de l'eau provoqué par le pompage de l'eau souterraine.

Transmissivité – obtenue en multipliant la conductivité hydraulique par l'épaisseur de la partie saturée de l'aquifère.

Zone non saturée – formation dans laquelle se trouve de l'eau qui ne remplit pas complètement tous les pores. Cette zone se trouve au-dessus du niveau de la nappe phréatique.

Introduction

Au niveau mondial, on estime à 900 millions le nombre de personnes n'ayant pas accès à une source d'eau potable améliorée, 84 % d'entre elles vivant dans des zones rurales (OMS/UNICEF 2010). Si le monde est globalement en bonne voie pour atteindre la cible 7C de l'objectif du Millénaire pour le développement (OMD) visant à «réduire de moitié, d'ici à 2015, le pourcentage de la population qui n'a pas accès à un approvisionnement en eau potable», cet objectif ne sera très probablement pas atteint dans les zones rurales d'Afrique subsaharienne.

L'amélioration de l'approvisionnement en eau souterraine (notamment par la construction de forages ou de puits creusés à la main) permet à une grande part de la population rurale d'avoir accès à une eau salubre, à une distance raisonnable de son lieu de résidence. L'eau souterraine est quasiment omniprésente dans la nature, et peut être captée progressivement et à un coût relativement faible pour répondre à la demande. Souvent moins coûteuse que l'eau de surface et généralement d'excellente qualité, elle ne nécessite normalement pas de traitement. Elle est toujours protégée de la pollution anthropique par les couches rocheuses qui la recouvrent. Cela est dû aux processus d'autoépuration naturelle dans la zone non saturée (au-dessus de la surface de la nappe phréatique) qui permet de réduire ou d'éliminer la contamination de l'eau souterraine (ARGOSS 2001).

Les technologies de captage d'eau ont connu une évolution considérable depuis les années 1960, et de nombreuses pompes immergées de qualité sont désormais disponibles à des prix abordables. De plus, l'industrie du forage se développe dans de nombreux pays. Il existe toutefois encore des problèmes importants concernant la qualité et le coût des ouvrages dans de nombreux pays en développement.

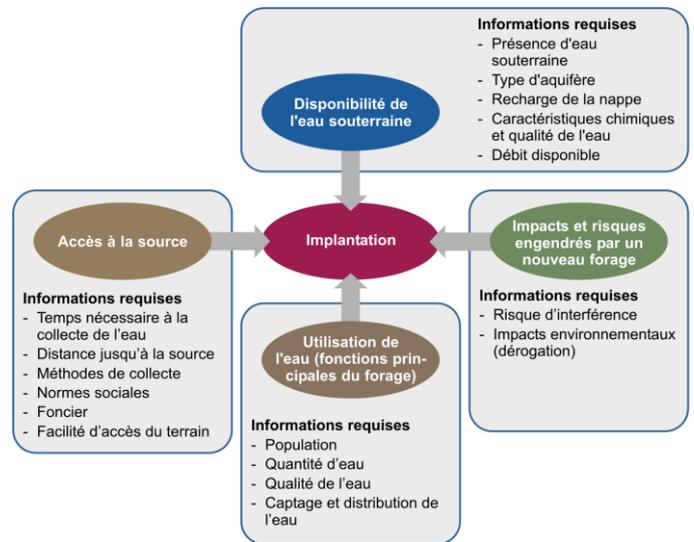
Le Code de bonnes pratiques pour la réalisation de forages (RWSN 2010) propose un cadre global et systématique d'analyse des principaux avantages et inconvénients de la construction de forage dans une collectivité ou un pays particulier. Il recommande le respect de neuf principes couvrant la réglementation de l'industrie du forage, la passation de marchés, la gestion des contrats ou les techniques de construction. Le recours à de pratiques d'implantation et de prospection éprouvées constitue l'un de ces principes.

Le présent document repose sur les dispositions du Code de bonnes pratiques. Il propose un guide pratique pour l'implantation de forages (y compris la passation de marchés et la gestion des contrats) à l'intention des chefs de projets ou de programmes, techniques ou non techniques. Il est destiné principalement aux bailleurs, autorités gouvernementales et ONG responsables de l'implantation et de la mise en œuvre d'activités liées à l'approvisionnement en eau. Il aborde en priorité les aspects techniques, mais également sociaux et organisationnels des travaux d'implantation. Il doit permettre au lecteur de définir avec précision les priorités et les tâches requises, mais aussi de préparer et gérer efficacement un contrat d'implantation.

La réussite et la pérennité d'un approvisionnement amélioré en eau souterraine repose en premier lieu sur le choix d'un site approprié. Afin de déterminer l'endroit le plus adapté, il convient de prendre en compte plusieurs éléments interdépendants (figure 1). La géologie et les ressources en eau souterraine locales sont fondamentales étant donné qu'elles conditionnent ce qu'il est possible de faire. La ou les utilisation(s) de l'eau, et les usagers eux-mêmes sont des facteurs importants à prendre en compte car ils influencent fortement l'endroit où l'eau est utilisée. La conséquence dommageable potentielle du projet sur l'environnement et les risques engendrés par un nouveau forage doivent être étudiés attentivement de façon à ne pas nuire aux captages existants et futurs. Enfin, il convient de prendre en compte les conditions d'accès à la ressource, non seulement pour le forage, mais aussi à plus long terme.

Ainsi, la connaissance approfondie et les bonnes pratiques des procédures d'implantation ont des conséquences importantes sur les coûts de l'approvisionnement en eau, ainsi que sur la viabilité environnementale et fonctionnelle des captages d'eau souterraine.

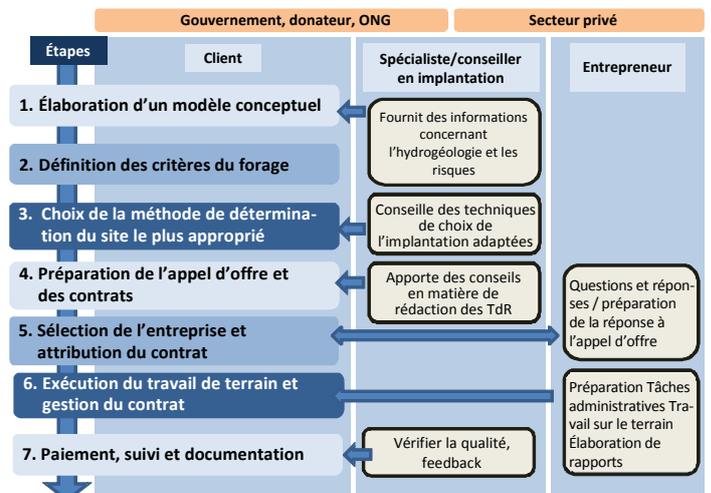
Figure 1 Différents aspects à prendre en compte lors de l'implantation



Il existe de nombreuses techniques d'implantation, chacune exigeant différentes compétences et investissements technologiques. Ces techniques, prises isolément ou conjointement, sont adaptées à différents contextes géologiques et différents usagers. Il est important d'utiliser les techniques appropriées. Par exemple, des études géophysiques¹ sont souvent menées en Afrique, alors même qu'elles ne sont pas toujours nécessaires.

Notre expérience nous a appris qu'il était nécessaire d'adopter une approche par étapes (figure 2) pour réussir la planification et la gestion d'un travail d'implantation. Ce document s'articule autour des étapes indiquées dans la figure 2, chacune des sections ci-dessous traitant d'une étape particulière.

Figure 2: Déroulement des opérations d'implantation d'un forage



¹ Voir glossaire

1 Modèle conceptuel

Pour être efficaces, la planification et la mise en œuvre des activités d'implantation nécessitent de rassembler les connaissances disponibles sur l'existence et l'état de la nappe souterraine locale, notamment les données climatiques et les renseignements relatifs à la sensibilité environnementale du pompage et à la recharge des nappes. Il convient de présenter ces informations sous forme d'un modèle conceptuel simple illustrant l'état des nappes souterraines, d'après les informations recueillies.

Ce modèle peut comprendre une carte géologique de base (ainsi que des informations sur les rivières, les aménagements, l'utilisation des terres). Il peut être interprété à l'aide des connaissances existantes, et complété si possible par des renseignements obtenus lors de visites de reconnaissance. Les zones bien dotées ou non en eaux souterraines et les contraintes relatives à la qualité de l'eau peuvent être mises en évidence à cette occasion. Des coupes simples comme celle illustrée à la figure 4 peuvent aider à choisir les techniques d'implantation et les méthodes de construction de forage les plus adaptées.

La présente section fournit les informations et les définitions de base nécessaires à l'élaboration d'un modèle hydrogéologique simple. Elle est destinée à un public composé de spécialistes et de néophytes et pourra donc permettre aux professionnels responsables de programmes de forage peu familiarisés avec l'hydrogéologie de mieux la comprendre. Si personne n'est en mesure de développer ce modèle au sein de l'organisme, il convient de recourir à des experts.

1.1 Présence d'eau souterraine

Il est nécessaire d'avoir, dès la phase de planification, une bonne connaissance des différentes manifestations et utilisations des eaux souterraines présentes dans la zone du projet, de façon à ce que la phase d'implantation des forages fasse partie intégrante du programme d'exécution du projet et ce, dès son démarrage.

L'eau souterraine est contenue dans les pores ou les ouvertures naturelles des formations rocheuses¹. Elle se présente généralement sous deux formes qui peuvent coexister dans une même formation:

- L'eau s'infiltré dans les espaces entre les grains (espaces intergranulaires) des roches meubles² et sédiments. On désigne ce phénomène sous le nom de porosité primaire (voir figures 3a et 3b).
- L'eau peut s'infiltrer dans les fractures ou fissures qui ne sont pas forcément reliées entre elles des roches consolidées² et dures. On parle alors de porosité secondaire (voir figures 3c et 3d). Les roches dures peuvent également contenir des espaces intergranulaires. Le volume relatif d'eau présent dans ces espaces et dans les fractures varie selon le type de roche.

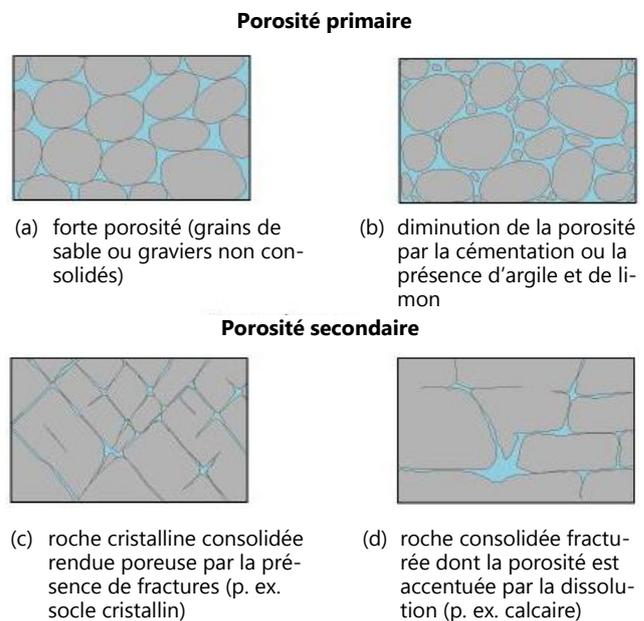
La proportion de vides dans la roche détermine le volume d'eau qu'elle peut emmagasiner et par conséquent la productivité de l'aquifère². L'un des principaux objectifs de l'implantation consiste à fournir des informations utiles sur les principales caractéristiques hydrogéologiques d'une zone cible (voir figure 4), permettant ainsi de prévoir une exploration plus poussée comportant un risque d'échec moindre.

Lorsque l'eau occupe les espaces intergranulaires ou en cas de fractures omniprésentes dans la roche (par exemple, dans des formations calcaires), les conditions d'implantation ou les méthodes de prospection ne sont généralement pas très complexes. En revanche, si l'eau n'est présente que dans quelques fractures, il faudra

généralement avoir recours à des techniques plus sophistiquées pour les localiser, sans quoi l'on risque de construire des forages négatifs.

Figure 3: Porosité primaire et secondaire

Source: MacDonald *et al.* 2005



1.2 Types d'aquifère

L'étude d'implantation doit déterminer le type d'aquifère prépondérant dans la zone du projet, de façon à préparer l'exploration et la campagne de forage de façon optimale. Il existe un certain nombre de conditions témoignant de la présence d'eau souterraine, comme le montre la figure 4.

- Les aquifères recouverts de formations imperméables (comme l'argile) peuvent contenir de l'eau sous pression. On les appelle alors des aquifères captifs ou nappes captives. Lorsqu'une nappe captive est découverte au cours du forage, le niveau d'eau s'élève sous l'effet de la pression (figure 4d), voire déborde (figure 4a).
- Un aquifère est dit libre si la surface de la nappe phréatique² est en contact avec l'atmosphère (espaces poreux remplis d'air). On qualifie d'aquifère perché une nappe libre, d'étendue et d'épaisseur limitée (figure 4b). Il est préférable d'éviter ce type de nappes (figure 4b) car leur volume d'eau est limité et elles sont susceptibles de s'assécher.

L'exploitation relativement attractive et peu coûteuse des nappes libres, généralement peu profondes et productives, est toutefois déconseillée dans les zones densément peuplées, en raison des risques de pollution (provenant par exemple de latrines, de fosses à purin, de pesticides et d'engrais, d'eaux de ruissellement urbaines ou encore de déchets industriels). Les nappes protégées par une matière peu perméable sont idéales du point de vue de la protection des eaux souterraines.

Différents types d'aquifères peuvent coexister au même endroit, à différentes profondeurs. La qualité de l'eau des différentes nappes peut également varier.

² Voir glossaire

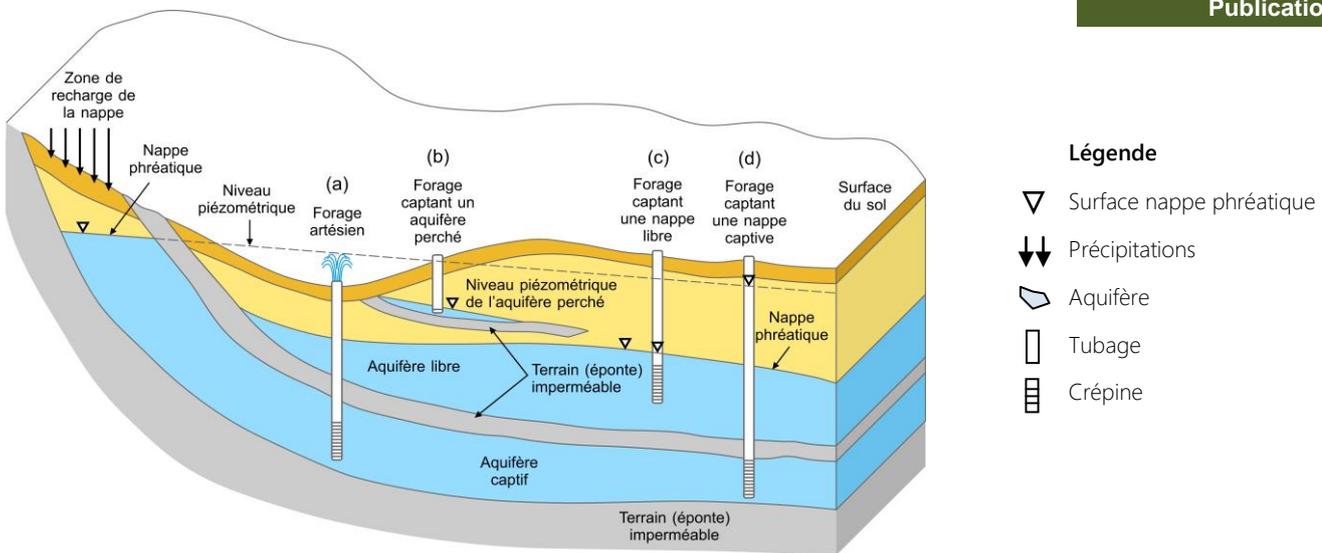


Figure 4: Eaux souterraines

Source: Todd *et al.* 2005

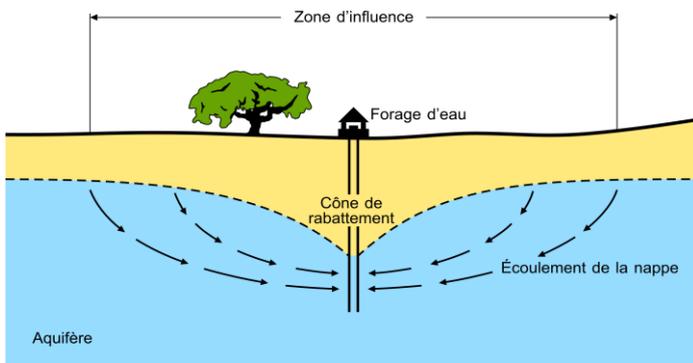
1.3 Effets du pompage

En cas de pompage dans une nappe libre (Figure 4c), le niveau de l'eau baisse et un cône de rabattement² se forme dans la nappe environnante (figure 5). L'eau s'écoule vers le forage au sein du cône de rabattement, et le pompage modifie le sens naturel d'écoulement de l'eau souterraine à l'intérieur de la zone d'influence située autour du forage.

À une certaine distance du forage (d'une dizaine de mètres à plusieurs kilomètres), le niveau de l'eau reste relativement inchangé, même après plusieurs heures de pompage. Le cône de rabattement dans le forage et la zone d'influence dépendent de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère (encadré 1).

Figure 5: Zone d'influence

Source: adapté de État de l'Oregon, 2010



Encadré 1: Transmissivité et coefficient d'emmagasinement

La **transmissivité** mesure la facilité avec laquelle l'eau peut s'écouler dans un aquifère par les espaces intergranulaires ou les fractures. Le **coefficient d'emmagasinement** quantifie le volume d'eau pouvant être libéré d'un aquifère pour un abaissement donné du niveau d'eau sur une surface définie. Lors de l'implantation d'un puits, on recherche généralement la transmissivité la plus élevée possible, notamment en cas de besoins d'approvisionnement très importants. Cela suppose de trouver une formation géologique qui sera très perméable, ou épaisse, ou les deux.

Si un forage est implanté trop près d'un point d'eau existant, d'une source, d'un ruisseau ou d'une zone humide, il risque d'affecter leur débit ou la circulation de l'eau entre la surface et le sous-sol. S'il est implanté trop près d'un autre point de captage, ils peuvent tous deux subir ce que l'on appelle une «interférence» et voir leur niveau piézométrique baisser. Il peut également affecter le débit d'autres

puits ou sources, le débit des cours d'eau en période d'étiage ou encore provoquer un assèchement des zones humides («impacts environnementaux»).

1.4 Alimentation de la nappe

Il convient, dans la mesure du possible, d'implanter un forage dans une zone rechargée régulièrement, par la pluie ou les rivières par exemple, en fonction de facteurs tels que les affleurements rocheux, la pente, l'état des sols et la végétation. Cet aspect est souvent négligé et peut entraîner, à long terme, la disparition de la ressource en eau - avec les coûts conséquents qui en découlent.

Les aquifères fournissent des volumes d'eau importants (mais non illimités) et se rechargent naturellement au fil d'une ou plusieurs saisons dans des zones climatiques variées. En climat humide, la nappe peut se recharger annuellement voire plus souvent, tandis qu'en climat sec, il peut se passer plusieurs années sans que la nappe ne soit réalimentée.

L'alimentation de la nappe se produit soit par infiltration directe et percolation profonde des précipitations (figure 4) soit par infiltration localisée des cours d'eau de surface. La proportion des précipitations servant à réalimenter la nappe varie considérablement en fonction de nombreux facteurs, notamment la géologie, la topographie, le type de sol, la végétation, l'intensité des précipitations et le climat.

On dit d'un aquifère qui n'a pas été réalimenté depuis une très longue période qu'il contient de l'«eau fossile». Il en existe dans des formations rocheuses très profondes des zones arides. Ces ressources importantes peuvent diminuer rapidement si le volume des prélèvements est élevé.

1.5 Caractéristiques chimiques et qualité de l'eau

Les eaux souterraines utilisées pour approvisionner la population doivent respecter les normes et directives nationales ou internationales applicables. L'étude d'implantation doit prendre en compte toutes les informations relatives aux caractéristiques chimiques des eaux souterraines.

Dans certains cas, ces eaux doivent être traitées pour devenir potables. Les caractéristiques chimiques des eaux souterraines peuvent être influencées par des facteurs géologiques mais également anthropiques (pratiques sanitaires inadaptées, pollution industrielle, eaux de ruissellement ou d'infiltration issues de l'agriculture tels que pesticides, engrais, etc.).

Dans certaines régions du monde, les eaux souterraines affichent des teneurs naturellement élevées en fer, arsenic et fluor. À forte concentration, l'arsenic et le fluor, dont la présence est liée aux conditions hydrogéologiques, sont toxiques. Leur présence dans une zone de projet donnée est généralement prévisible, mais ça n'est pas le cas à l'échelle de la communauté; aussi conviendra-t-il d'être extrêmement prudent dans le choix de l'implantation.

La présence de fer dans les eaux souterraines ne présente pas de risque pour la santé, sauf en cas de concentration très forte. Les usagers risquent toutefois de refuser de consommer ces eaux, pourtant potables, au profit d'une eau de surface dangereuse pour la santé mais ayant meilleur goût et ne tachant pas les vêtements ou les ustensiles de cuisine. La présence de fer dissous est très commune dans les eaux souterraines légèrement acides et contenant peu d'oxygène. Ce problème peut donc être anticipé et des mesures planifiées (par exemple l'utilisation de pompes dotées de pièces souterraines en plastique qui ne rouillent pas ou l'installation de postes d'élimination du fer dissous).

Les eaux souterraines en milieu urbain ou périurbain sont souvent contaminées par la présence d'agents pathogènes et de produits chimiques dérivés des matières fécales, des déchets solides et de la pollution industrielle. Ces polluants résultent de la forte densité de population, d'une mauvaise gestion de l'environnement et des déchets et de la nature de l'aquifère, libre et peu profond.

Dans le but d'éviter toute pollution anthropique, l'implantation de forages à proximité des habitations se fera loin des latrines, des dépressions, des cours d'eau asséchés et des canaux exposés aux inondations saisonnières. Des taux de prélèvement élevés près du littoral peuvent entraîner une salinisation excessive des eaux prélevées. La contamination des eaux souterraines par l'eau salée est un processus quasi irréversible.

Pour de nombreuses régions, il existe déjà de nombreuses informations sur les caractéristiques chimiques et la qualité des eaux souterraines. Le traitement permanent de l'eau est très onéreux. Dans l'idéal, il convient d'éviter tous les secteurs qui présentent des problèmes microbiologiques, chimiques ou esthétiques (goût et odeur) affectant la qualité des eaux souterraines. Il sera cependant parfois préférable dans certains cas de traiter l'eau pour éliminer les fortes concentrations en arsenic ou en fluor plutôt que d'utiliser des eaux de surfaces contaminées par des matières fécales.

2 Caractéristiques du forage

Avant de décider du lieu d'implantation d'un ou plusieurs forages, il convient de prendre en compte les exigences en termes d'utilisation de l'eau, de population cible, de quantité et de qualité de l'eau ainsi que les mécanismes de pompage et de distribution. Cette section présente les impacts de six usages de l'eau sur le choix du lieu d'implantation.

2.1 Pompes manuelles en milieu rural

Lors de l'implantation de forages équipés de pompes manuelles, il convient de veiller à la facilité d'accès des usagers, tant sur le plan physique que sur le plan social (classe socio-économique, caste, handicap ou autres facteurs pouvant exclure certains groupes d'usagers). Il est nécessaire de définir clairement la population ciblée et d'identifier les différents sous-groupes au sein de cette population en fonction de leur richesse, pouvoir, position ou influence. Les populations les plus pauvres et celles issues des classes inférieures seront presque inévitablement marginalisées par celles détenant le pouvoir ou jouissant d'une certaine autorité. Souvent, les plus puissants tentent d'abuser de leur position afin que le forage soit implanté à leur convenance. Or, ce sont principalement les filles et les femmes qui sont chargées de transporter l'eau pour les usages domestiques. Elles sont donc davantage concernées par les nouveaux points d'eau et leur implantation.

Pour lutter contre ces problèmes de marginalisation, certaines organisations implantent délibérément les forages dans les quartiers pauvres, de façon à introduire une discrimination positive en faveur de leurs habitants tout en n'excluant pas les usagers les plus riches ou les plus puissants. Il est possible pour ce faire d'avoir recours à des méthodes de prise de décision participative.

2.2 Captage motorisé avec réseau d'adduction

Les captages fonctionnant au moyen d'une pompe motorisée, d'un réservoir de stockage et d'un réseau de canalisations sont courants dans certains pays (au Sénégal, par exemple). Il convient ici d'implanter le forage à proximité raisonnable des usagers afin de minimiser la hauteur de refoulement de la pompe ainsi que l'investissement et les dépenses d'exploitation du réseau. Le forage doit également être situé à proximité de l'alimentation électrique ou du moins être facilement accessible par les camions de livraison de carburant et les équipes de maintenance. L'étude d'implantation des bornes fontaines publiques (le cas échéant) doit prendre en compte des considérations similaires à celles des forages dotés de pompes manuelles.

2.3 Alimentation en eau des petites villes et camps de réfugiés

Pour l'approvisionnement des petites villes, deux éléments supplémentaires sont à prendre en compte: (a) la forte probabilité de contamination des eaux souterraines en-dessous des centres urbains, et (b) la forte demande en eau du fait de la forte densité de population. Pour ces deux raisons, les champs captants qui desservent les petites villes sont souvent implantés *extra muros*, dans des aquifères productifs et moins susceptibles d'être pollués, avec des canalisations d'adduction pour distribuer l'eau aux consommateurs.

Dans les camps de réfugiés et de personnes déplacées, la densité de population peut être aussi élevée que dans les villes, mais les exigences en matière d'approvisionnement en eau sont généralement beaucoup plus faibles (la norme Sphère est de 15 litres par personne et par jour, contre environ 100 litres dans une ville disposant de l'eau courante). Les points de captage sont souvent situés beaucoup plus près des usagers, ce qui les expose au risque de contamination, notamment dans les camps de longue durée.

2.4 Usages agricoles

La production agricole est responsable de 70 % de la demande en eau douce (UNESCO 2009). Les systèmes d'irrigation à moyenne et grande échelle nécessitent de très grandes quantités d'eau qui peuvent être pompées dans des aquifères productifs souvent au moyen de pompes immergées à moteur diesel. Les petites exploitations, et plus particulièrement les systèmes d'irrigation gérés par les agriculteurs, nécessitent un plus grand nombre de petits puits ou forages. Les exigences d'implantation des forages sont généralement plus strictes dans le premier cas. Les eaux de ruissellement ou d'infiltration dans des zones soumises à une agriculture intensive lorsqu'elles atteignent la nappe peuvent entraîner une pollution des eaux souterraines par les engrais et les pesticides.

L'eau destinée au bétail est un élément important et souvent négligé de la demande agricole en eau. Les animaux d'élevage ont besoin de plus grandes quantités d'eau que les humains, mais les exigences sur la qualité sont moins strictes. Sans une gestion rigoureuse des points d'eau, la consommation par le bétail peut rapidement entraîner une contamination de la nappe et une dégradation des terres. Ce problème concerne particulièrement les zones de pastoralisme, où l'on pratique la transhumance.

2.5 Usages multiples

On admet de plus en plus aujourd'hui les usages multiples de l'eau par l'homme, qui a recours à de nombreuses sources d'approvisionnement, selon la saison, l'année et l'usage. Par exemple, de nombreux habitants des zones rurales transportent l'eau à leur domicile (souvent, de l'eau souterraine de bonne qualité) pour boire et s'alimenter; ils se baignent et lavent leurs vêtements dans les eaux de surface (cours d'eau saisonniers et permanents) ou l'eau issue des puits peu profonds; ils cultivent la terre et abreuvant leur bétail dans les plaines alluviales et les marais naturels.

En outre, certains programmes encouragent activement les populations à mener des activités économiques de production (potagers, élevage, fabrication de briques) utilisant l'eau des nouveaux forages, ce qui risque d'entraîner une pression supplémentaire sur des ressources en eau limitées, tant en termes de quantité que de qualité.

Le responsable de l'implantation peut devoir prendre en compte la complexité de ces usages multiples et des sources diversifiées.

2.6 Usages industriels

La source d'approvisionnement en eau des industries doit très souvent être située près des entreprises concernées, sauf en cas de besoins très élevés. Dans ce cas, les mêmes considérations s'appliquent que pour l'approvisionnement des zones urbaines. Trop souvent, les industries consommatrices d'eau s'installent sans avoir réfléchi préalablement à la source d'alimentation ou au traitement des eaux usées. Dans l'idéal, les entrepreneurs souhaitant construire des brasseries, des usines de transformation agroalimentaire ou d'autres industries très consommatrices en eau doivent au préalable consulter des spécialistes de l'implantation de puits.

2.7 Exigences en matière de captage

Le tableau 1 présente quelques estimations très approximatives des volumes d'eau quotidiens nécessaires en fonction de l'usage prévu.

Tableau 1: Alimentation et demande en eau

Usage	Échelle	Demande approximative [m ³ /jour]	Taux de pompage moyen [l/sec]*
Alimentation en eau - milieu rural	Forage unique pour 100 à 300 personnes	2 - 6	0,1 - 0,3
Alimentation en eau d'une petite ville	Forage unique pour 2 000 à 10 000 personnes	500 - 2 000	2 - 10
Irrigation	100 ha	5 000	140
Hypothèses de consommation: Approvisionnement en eau en milieu rural 20 litres/personne/jour Approvisionnement en eau d'une petite ville - 40 litres/personne/jour Irrigation - 50 m ³ /ha *En supposant que l'eau est pompée dix heures par jour.			

3 Détermination du site le plus adapté

Afin de déterminer l'emplacement le plus adapté pour le forage, il convient de tenir compte de divers aspects techniques, environnementaux, sociaux, financiers et institutionnels. L'étude d'implantation doit permettre de mettre en évidence les caractéristiques principales des nappes souterraines de la zone du projet et de déterminer le type de forage à construire. Une étude d'implantation professionnelle implique un travail de recherche, une reconnaissance de terrain et l'exploitation complète des données existantes.

La procédure réelle d'implantation du puits exige (i) l'examen des facteurs déterminants et le bon usage à la fois de (ii) sources d'informations et (iii) de techniques d'implantation et de prospection. La présente section examine ces trois aspects et propose une approche logique de l'implantation.

3.1 Facteurs déterminants

Afin de déterminer le meilleur emplacement pour le forage, il convient de prendre en compte dix facteurs particulièrement importants:

- **Débit suffisant pour l'usage prévu.** Prévoir environ 0,1-0,3 l/sec. pour un point d'eau en milieu rural équipé d'une pompe ma-

nuelle, 2-10 l/sec. pour une petite ville. Voir la section 2 pour plus de détails en cas de besoins à plus grande échelle (irrigation d'une surface importante par exemple). Ces informations sont parfois disponibles dans des documents ou cartes existantes (voir *Sources d'information*) ou peuvent être obtenues par un essai de pompage sur un forage existant³ (voir RSWN 2010, annexe 5).

- **Ressources renouvelables en quantité suffisante pour l'usage prévu.** Même si le forage est en mesure de fournir un certain débit à court et moyen terme, il ne pourra produire à long terme si la nappe n'est pas régulièrement renouvelée par l'infiltration des eaux de pluie ou des rivières. Il est donc important d'évaluer le degré d'alimentation de la nappe et les fluctuations dans le temps. Cette estimation peut se baser sur le bilan hydrique de la zone.
- **Qualité de l'eau appropriée pour l'usage prévu.** Les exigences en matière de qualité de l'eau diffèrent selon l'usage prévu. L'eau destinée à l'usage domestique doit être exempte d'agents pathogènes (véhiculés par les excréments humains) et doit avoir une teneur très faible en espèces chimiques toxiques telles que l'arsenic ou le fluor. Si l'eau souterraine est utilisée à des fins d'irrigation, son niveau de salinité doit être contrôlé. L'implantation des forages doit donc tenir compte des documents attestant de la présence de ces substances indésirables. L'eau des forages finalisés et développés doit être analysée et les résultats comparés aux normes nationales. En l'absence de normes, il est possible de se référer aux directives de l'OMS en matière d'eau de boisson (OMS 2008).
- **Absence de sources potentielles de contamination.** Il est essentiel d'éviter les sources de contamination ponctuelles telles que latrines, fosses septiques, enclos à bétail, cimetières et décharges. Il peut exister des directives nationales prévoyant la distance minimale à respecter autour d'un point d'eau ou définissant des zones de protection des eaux souterraines.
- **Préférences de la population, besoins des femmes et propriété foncière.** Il est primordial de négocier avec la communauté et d'obtenir son accord sur le choix du site de forage. Lors des négociations, les professionnels expliqueront les contraintes techniques tout en tenant compte des préférences de la communauté et plus particulièrement des besoins des femmes, qui sont généralement responsables de la corvée d'eau. Il faut également tenir compte des questions liées à la propriété foncière afin d'éviter les conflits ultérieurs entre le propriétaire du terrain et les usagers. Des accords formels concernant la propriété foncière et l'accès aux sources d'eau sont parfois nécessaires.
- **Proximité du point d'eau.** Dans les limites des contraintes liées à la géologie, aux ressources et à la qualité de l'eau, les forages devront idéalement être implantés le plus près possible des lieux d'utilisation. Cela signifie qu'il faut minimiser les distances à parcourir à pied en milieu rural (dans le cas de forages équipés de pompes manuelles) ainsi que les coûts énergétiques des pompes électriques ou à combustible et des réseaux d'alimentation. Une rapide évaluation du site devra être entreprise afin de réaliser une carte de la communauté. Des entretiens avec les habitants permettront de mieux comprendre les préférences de la communauté concernant l'implantation du forage. En général, il est demandé à la communauté d'identifier trois sites d'implantation, classés par ordre de priorité.
- **Accessibilité des équipes de construction et de maintenance.** Si le forage est construit au moyen d'équipements lourds, il est essentiel de prévoir l'accès au site des foreuses, compresseurs et véhicules de soutien logistique. Même en cas d'utilisation d'un équipement plus léger, il est important de pré-

³ Voir glossaire.

voir un accès motorisé pour la construction et la maintenance. Le choix du site doit donc prendre en compte ces facteurs.

■ **Absence d'interférence avec d'autres sources d'eau souterraine et d'autres usages.** Dans les zones où des captages ont déjà été mis en place, la construction d'un nouveau forage peut engendrer un rabattement⁴ plus important pour les forages existants. Ceci peut conduire à une augmentation des coûts de pompage (énergie) à la fois pour les forages existants et le nouveau forage, une baisse de rendement, une modification de la qualité des eaux souterraines et l'émergence de conflits entre les usagers. Dans une première phase de l'étude d'implantation, il convient d'examiner les interférences possibles et les risques d'abaissement de la nappe. Cela signifie que la zone d'influence des forages existants doit être établie et que les nouveaux forages doivent être implantés hors de cette zone. Dans les situations à haut risque, d'éventuels nouveaux sites pourront être envisagés.

■ **Absence d'interférence avec les exutoires naturels.** De la même façon, construire un forage trop proche d'une source, d'un cours d'eau ou d'une zone humide peut entraîner la diminution du niveau de l'eau, voire l'assèchement d'importantes ressources, ce qui perturbe les écosystèmes et affecte les usagers qui en dépendent. L'intrusion d'eau salée due à une exploitation trop importante de l'eau souterraine à proximité du littoral peut aussi conduire à une dégradation irréversible de la qualité de l'eau.

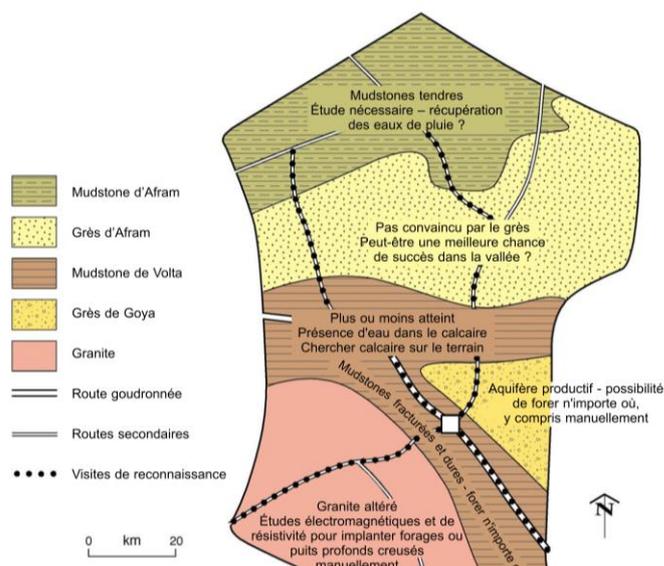
■ **Risques.** Au cours de l'étude d'implantation, les risques de forage négatif doivent être évalués et catégorisés (faible, moyen, élevé). Pour les forages destinés à être équipés de pompes manuelles situés dans les zones préalablement soumises à une étude préliminaire hydrogéologique, les techniques géophysiques (par exemple résistivité, conductivité) sont rarement requises. Le creusement d'un forage d'exploration de petit diamètre (à l'aide d'une petite tarière manuelle, par exemple) peut aussi servir de méthode de localisation adéquate pour des forages peu profonds. Toutefois, ce trou doit être rebouché correctement par la suite pour éviter la contamination de l'aquifère.

3.2 Sources d'information

Il est essentiel d'utiliser les sources d'information décrites ci-dessous pour étayer les techniques d'implantation décrites dans la section suivante, sans oublier les considérations sur les différents usages de l'eau et les besoins des différents groupes d'usagers tels que mentionnés à la section 2.

Cartes: les cartes topographiques fournissent les informations de base nécessaires aux programmes d'implantation de forage. Le nom et la localisation des communautés ne sont pas toujours exacts, mais l'information sur les terrains et les rivières est généralement précise et fournit des indications utiles sur la situation des sites et leur accessibilité. Les cartes géologiques et hydrogéologiques présentent, sous forme visuelle, un grand nombre d'informations complexes synthétisées. Heureusement il existe de nombreuses cartes géologiques à une échelle utilisable pour les projets de forage. Les cartes hydrogéologiques aux mêmes échelles sont, elles, beaucoup plus rares. La légende est aussi importante que la carte elle-même car elle comporte des informations descriptives, utiles pour exploiter pleinement la carte. Les cartes géologiques sont souvent accompagnées de bulletins rédigés par le service géologique national qui fournissent des précisions utiles.

Figure 6: Exemple de carte de prospection



Plus récemment, des cartes précisant le potentiel d'exploitation des eaux souterraines, souvent à l'échelle locale, ont été produites. Les informations hydrogéologiques et les données de forage ont été reportées sur ces cartes et interprétées afin de repérer les zones offrant un bon potentiel d'exploitation des eaux souterraines et celles susceptibles de présenter des contraintes importantes à la fois en termes de quantité et de qualité.

L'imagerie satellite peut être utilisée pour les régions isolées (voir par exemple le lien suivant: <http://www.earth.google.com>.)

Documents: il existe une grande variété de documents, rapports de projets, schémas directeurs, bulletins d'études géologiques, rapports de consultants et de foreurs, études de projets d'ONG, études universitaires et données météorologiques (précipitations), pouvant fournir des informations utiles sur les zones envisagées pour l'exploitation des eaux souterraines. Ces documents peuvent être consultés auprès des ministères en charge des ressources en eau, des services géologiques nationaux, des ONG, des consultants, des universités et des instituts de recherche. Cependant, ils ne sont pas toujours réellement archivés et il faut parfois beaucoup de persévérance et de détermination pour les trouver.

Visites sur le terrain et entretiens avec la population: ces méthodes peuvent fournir des informations utiles sur les ressources locales, y compris les fluctuations saisonnières. D'autres informations sur les préférences en matière de sources d'approvisionnement, les usages de l'eau, les problématiques liées au genre et les intérêts économiques peuvent aussi être recueillies et influencer sur le choix du site d'implantation.

Dossiers, bases de données et échanges de données en matière de forage: souvent, l'information la plus fiable sur la géologie et l'hydrogéologie locales vient de l'expérience de terrain des précédentes activités de forage et de creusement de puits. Dans l'idéal, cette expérience se trouve résumée dans les diagraphies de forage et les rapports des géologues, conservés dans les bases de données nationales. Dans les faits, ces documents ne sont pas toujours conservés (notamment en cas de forage négatif), ou n'ont pas été transmis (notamment dans le cas d'ONG ou de particuliers) ou collectés (notamment lorsque les ressources publiques sont limitées, et que la priorité est donnée aux nouvelles constructions plutôt qu'à la tenue d'archives). Dans le meilleur des cas, ces journaux de forage, dossiers et bases de données peuvent être des sources d'information extrêmement utiles.

⁴ Voir glossaire.

Dans un programme de forage, le coût supplémentaire correspondant au recueil de ces données est relativement faible comparé aux avantages fournis par l'accumulation de connaissances, la meilleure qualité des interprétations et la fiabilité accrue du modèle conceptuel des eaux souterraines locales. La comparaison des résultats du forage aux techniques d'implantation spécifiques utilisées, au moyen d'une évaluation systématique, site par site et sur la globalité du projet, serait encore plus avantageuse. Cette évaluation de la «réussite» de l'implantation témoigne de la compétence de l'opérateur et de la qualité des techniques utilisées, mais n'est que très rarement effectuée et presque jamais publiée. Elle est également rendue difficile par le fait que l'implantation et la construction sont souvent effectuées par des organismes différents. S'il s'agit d'entrepreneurs ou de consultants privés, ils peuvent considérer les données d'implantation comme des informations confidentielles qu'ils ne sont pas disposés à partager.

3.3 Techniques d'implantation

Il existe de nombreuses techniques pour sélectionner le site d'implantation d'un forage. Les plus couramment utilisées sont exposées ci-dessous. Il n'existe pas de technique unique qui conviendrait à toutes les situations. Il faut au contraire identifier la technique adaptée aux conditions locales et aux types de roches de la zone, et notamment aux trois situations de complexité hydrogéologique croissante prévues à la section 3.4. Certaines de ces techniques peuvent sembler simplistes; elles exigent toutefois une expérience et des compétences considérables pour comprendre et interpréter correctement les résultats. Il est donc fortement recommandé de faire appel à un hydrogéologue ou un technicien formé et de les appliquer sous la supervision de celui-ci.

Téledétection: l'utilisation de la photographie aérienne, du radar à visée latérale et de l'imagerie satellite jouent un rôle important dans l'identification des limites géologiques et des caractéristiques hydrologiques (telles que les fractures profondes) qui ne sont pas toujours visibles sur le terrain. Ces techniques de téledétection nécessitent cependant systématiquement une vérification indépendante au sol, au moyen d'une reconnaissance de terrain, d'une étude géophysique ou d'un sondage afin de confirmer les résultats obtenus à distance. La téledétection peut être très utile mais il est important de connaître ses limites.

Elle sert en premier lieu au cours des phases de planification et de reconnaissance et en second lieu à circonscrire les zones cibles ou à localiser des caractéristiques spécifiques pour l'étude géophysique, à localiser et délimiter les communautés nécessitant un approvisionnement en eau et à identifier les sources d'approvisionnement existantes. Dans ce deuxième cas, les photographies aériennes conventionnelles en noir et blanc se révèlent extrêmement utiles.

Études hydrogéologiques de terrain: la reconnaissance hydrogéologique de terrain permet de vérifier les informations obtenues à partir de cartes, documents, photographies aériennes ou images satellites. Ainsi, les formations géologiques indiquées sur la carte doivent être confirmées par les affleurements rocheux (visibles dans le lit des rivières ou les tranchées routières, par exemple). La topographie et la géomorphologie locales peuvent influencer sur la présence d'eau souterraine, son stockage et son écoulement ainsi que sur l'alimentation des nappes. L'observation de ces éléments peut permettre de repérer les sites favorables. La couverture végétale reflète parfois les conditions géologiques et peut indiquer la présence de nappes peu profondes.

La reconnaissance de terrain permet de localiser et d'examiner les puits et forages existants afin de vérifier les informations recueillies précédemment auprès de sources secondaires concernant leur débit et niveau d'eau. Leur état et leur fonctionnement doivent être consignés, ainsi que toute preuve visuelle de problèmes de qualité de l'eau (taches de rouille, présence de fluor) et toute source pro-

bable de contamination. Ces informations doivent être complétées par les renseignements fournis par les communautés locales, qui sont souvent très bien informées sur leur environnement local et les sources d'eau qui les entourent. Les anciens peuvent parfois indiquer des trous d'eau asséchés ou se souvenir des types de végétation qui existaient avant la déforestation.

Ces informations doivent porter sur les problèmes de qualité de l'eau ainsi que sur les variations normales saisonnières et les effets des sécheresses les plus graves sur les débits et le niveau des nappes souterraines, aussi bien dans les sources d'approvisionnement traditionnelles que dans les sources améliorées. Toutes les informations recueillies lors de la reconnaissance de terrain doivent être soigneusement enregistrées (carnet de terrain dessins, photographies, GIS, autres outils de terrain). La participation d'agents communautaires formés, capables de converser dans la langue locale, est fortement conseillée.

Si l'étude permet d'attester la présence d'eau souterraine, les sites d'implantation peuvent être sélectionnés sans prospections géophysiques complémentaires. C'est généralement le cas de la plupart des zones dotées de conditions hydrogéologiques simples composées de matériaux sédimentaires meubles et d'eau souterraine peu profonde (figure 7 - scénario 1) et des formations rocheuses cristallines altérées (granites et gneiss) recouvertes par un régolite altéré, vaste et raisonnablement uniforme (figure 7 - scénario 2). L'étude doit aussi permettre de faire un choix quant à la pertinence hydrogéologique des différents sites pour la réalisation d'un puits creusé ou d'un forage lorsque les deux sont envisagés dans le cadre d'un programme.

Dans ces conditions, il peut être très rentable d'adopter une approche combinant l'information existante, la téledétection et l'enquête de terrain, mais elle ne sera efficace que si elle est dirigée par un hydrogéologue expérimenté. En outre, un personnel qualifié et ayant des connaissances en hydrogéologie sera nécessaire pour déterminer la pertinence d'une telle approche et la nécessité d'investissements supplémentaires dans des études géophysiques, puis pour planifier et mettre en œuvre ces études et interpréter les résultats.

Études géophysiques: Les études géophysiques sont, de loin, les techniques les plus couramment utilisées pour l'implantation de forage. Elles permettent de mesurer les propriétés physiques des roches (résistivité, conductivité, champs magnétiques et propriétés acoustiques), mais ne permettent pas en général de détecter directement la présence d'eau. Les contrastes des propriétés du sous-sol (roches et eau) sont interprétés par rapport aux caractéristiques géologiques susceptibles de favoriser le stockage et la circulation des eaux souterraines. Dans des circonstances favorables, ces techniques permettent de détecter des fractures verticales dans les roches dures, des stratifications dans les formations horizontales et le contraste entre roches humides et roches sèches et entre eau douce et eau salée. Comme pour la téledétection, il convient de vérifier la réalité sur le terrain et de connaître les limites de ces études.

Si elles permettent d'aider à localiser des sites favorables, elles sont souvent intégrées systématiquement à l'appel d'offres, dans l'espoir qu'elles aboutissent à des informations utiles. Cette approche est rarement récompensée et il est fréquent que la géophysique n'apporte rien de concret quant à la fiabilité de l'implantation.

Bien qu'il existe de nombreuses techniques géophysiques, les plus couramment utilisées pour l'implantation de forages sont les méthodes liées à la **résistivité électrique** et les **méthodes électromagnétiques**, ainsi que quelques applications liées à la réfraction sismique et aux techniques magnétiques (voir le tableau 2 pour un résumé des principales caractéristiques et qualités de ces techniques dans différents environnements hydrogéologiques).

La méthode de la résistivité a été employée pendant de nombreuses années et peut être utilisée de deux façons distinctes. La première consiste en **sondages électriques verticaux** (SEV) dans lesquels les variations de la résistivité du sous-sol sont mesurées à l'aide d'électrodes alignées par rapport à un point fixe et peuvent être interprétées comme des suites de couches géologiques. La seconde est le **traîné de résistivité**, qui consiste à déplacer la ligne d'électrodes sur le terrain pour fournir une information qualitative sur les variations latérales dans les types de roches et structures du sous-sol.

L'étude de la résistivité a largement laissé place à l'utilisation de méthodes électromagnétiques, qui donnent des renseignements plus fiables sur les variations latérales de résistivité, bien plus rapidement et à moindre coût.

La résistivité électrique et les méthodes électromagnétiques sont les deux méthodes géophysiques les plus utilisées. Les équipements nécessaires à ces études sont relativement peu coûteux, robustes et faciles à utiliser sur le terrain. Ils sont donc utilisés systématiquement par des techniciens de terrain n'ayant pas de formation en géologie.

Toutefois, afin d'obtenir les meilleurs résultats et de pouvoir interpréter les données issues des méthodes géophysiques, il est nécessaire d'avoir une bonne expérience et de faire le lien avec les connaissances hydrogéologiques locales. En réalité, une étude d'implantation effectuée par des opérateurs et des analystes inexpérimentés peut réduire la probabilité de trouver de l'eau. Si l'interprétation est mauvaise, il est parfois préférable de forer au hasard.

Tableau 2: Techniques géophysiques pour l'implantation d'un puits dans différents environnements hydrogéologiques

Technique	Propriétés mesurées	Profondeur maximale approximative de pénétration	Résultats et applications	Pertinence pour différents milieux hydrogéologiques
Résistivité: sondages électriques verticaux (SEV)	Contrastes verticaux de résistivité apparente du sol	100 m	Sondage géoélectrique 1D. Profondeur jusqu'à la roche-mère et épaisseur/variation des dépôts superficiels, profondeur jusqu'à la nappe phréatique, profondeur de l'altération, localisation de l'interface avec l'eau salée. Étalonnage des études.	Sables dans les formations alluviales, régolite résultant de l'altération du socle cristallin, moins utile dans les formations sédimentaires consolidées et les formations volcaniques.
Résistivité: traîné électrique	Variations latérales de la résistivité apparente	100 m (utilisé à une profondeur moindre en pratique)	Profils., Localisation de vallées enfouies et de zones de fractures verticales. Détermination des variations de profondeur de l'altération.	Socle cristallin fracturé et altéré. Moins utile dans d'autres milieux. Largement remplacé par les méthodes électromagnétiques.
Électromagnétique: domaine fréquentiel (FDEM)	Conductivité électrique apparente du sol	50 m	Profils électromagnétiques ou pseudo-sections 2D obtenues par inversion. Variation de l'épaisseur et de la nature de la zone altérée et des dépôts superficiels; localisation des zones de fracture.	Socle cristallin fracturé et altéré. Moins utile dans d'autres milieux. Méthode d'étude rapide et simple.
Électromagnétique: transitoire ou en domaine temporel (TDEM)	Résistance électrique apparente du sol, habituellement en un seul point	150 m	Sondages électromagnétiques 1D semblables au SEV. Mieux adapté pour localiser les contrastes à travers les terrains de couverture conducteurs que le FDEM.	Socle cristallin fracturé et altéré. Moins utile dans d'autres milieux. Onéreux et plus difficile à réaliser que FDEM.
Fréquence très basse (FTB)	Champs magnétiques secondaires induits par les émetteurs	40 m	Profils électromagnétiques ou pseudo-sections 2D obtenues par inversion pour localiser les zones de fracture et les fossés, ainsi que la profondeur du socle et du niveau piézométrique.	Socle cristallin fracturé et altéré, formations volcaniques.
Réfraction sismique	Vitesse des ondes sismiques à travers le sol	30 m	Sections sismiques synthétiques 2D. Localisation des zones de fracture et évaluation de l'épaisseur des dépôts superficiels. Moins utile pour les variations dans les dépôts superficiels. Long et difficile à interpréter.	Socle cristallin fracturé et altéré. Non adapté pour formations volcaniques, alluvions et roches sédimentaires consolidées.
Magnétique	Intensité du champ magnétique terrestre	100 m	Profils électromagnétiques ou interpolation spatiale et contours 2D. Localisation de filons magmatiques	Roche-mère fracturée et formations volcaniques.
Géoradar	Réflexions à partir des zones de changement de la constante diélectrique.	10 m	Sections radar synthétiques 2D. Détermine l'épaisseur de sable et de gravier, la profondeur jusqu'au socle, la profondeur potentielle jusqu'au niveau piézométrique. Localise les fractures horizontales ou les cavités karstiques.	Formations alluviales, calcaires karstiques. Ne peut pas pénétrer l'argile. Peu utilisé pour l'implantation de forages.
Gravité	Contrastes de densité entre les matériaux géologiques	300 m	Sections radar synthétique 2D et surfaces avec courbes de niveaux. Géométrie des bassins sédimentaires, localisation des vallées enfouies, cavités dans les formations karstiques.	Larges formations alluviales et aquifères sédimentaires consolidés, calcaires karstiques. Peu utilisé pour l'implantation de forages.

Établi à partir de: Van Dongen et Woodhouse (1994), Macdonald et al (2005) et Misstear et al (2006).

Sondages d'exploration: lorsque l'obtention de débits importants indiqués au tableau 1 est requise et que les conditions hydrogéologiques sont complexes, le recours à des sondages d'exploration peut être justifié. Le forage manuel simple, technique de choix pour des millions de forage en Asie du Sud-Est, gagne en popularité dans certaines régions d'Afrique (RWSN 2009). Cette technique est également utilisée pour confirmer l'adéquation du sous-sol au forage et à la construction de forages peu profonds. L'utilisation de foreuses mécaniques est souvent nécessaire dans les formations consolidées. Quelle que soit la méthode utilisée, l'action de forer à proprement parler doit venir dans un deuxième temps et s'appuyer sur les résultats cumulés des méthodes décrites ci-dessus afin de sélectionner les sites les plus prometteurs et d'éviter un forage de reconnaissance aléatoire. Le sondage d'exploration doit être correctement planifié et supervisé par un personnel expérimenté et compétent en hydrogéologie afin de garantir les meilleurs renseignements possibles sur les séquences géologiques, les niveaux d'eau, le débit potentiel et la qualité des nappes souterraines.

3.4 Approche logique pour l'implantation d'un forage

L'étude d'implantation ne consiste pas seulement à mettre en œuvre la science des eaux souterraines mais englobe également les aspects sociaux, économiques et institutionnels ainsi que la gestion de l'approvisionnement en eau. Les aspects liés à l'utilisateur soulignés à la section 3.1 (préférences communautaires, besoins des femmes et proximité du point d'eau) sont importants. Toutefois, cela doit être contrebalancé par la nécessité de sélectionner les sites sur le fondement de critères hydrogéologiques assurant les meilleures chances d'obtenir des débits suffisants et durables en eau de bonne qualité. Ceci peut limiter les possibilités.

De nombreuses techniques de prospection existent et s'avèrent souvent bien utiles pour l'étude d'implantation. Cependant, aucune n'est valable en toute circonstance, et leur réussite dépend de leur bonne utilisation et de leur mise en œuvre dans les situations appropriées. La difficulté consiste à adapter les efforts, l'intensité et les coûts de recherche à la complexité et à l'incertitude des conditions hydrogéologiques ainsi qu'aux besoins des usagers.

Pour une approche logique et systématique de l'implantation, il est recommandé de suivre les étapes suivantes:

- Identification de caractéristiques du sol pouvant indiquer des conditions favorables à des résurgences;
- Sélection de la/des méthode(s) géophysique(s) de prospection des zones la/les plus adaptée(s);
- Planification du travail sur le terrain et de l'interprétation des résultats;
- Mise à disposition de personnel suffisamment qualifié et expérimenté pour entreprendre le travail de terrain et interpréter les résultats;
- Mise à disposition des ressources et des financements suffisants pour réaliser le travail.

Les trois scénarios présentés à la figure 7 illustrent cette approche logique:

- **Scénario 1:** l'hydrogéologie locale est connue et peu complexe; l'eau souterraine est relativement facile à trouver et les forages peuvent être implantés quasiment n'importe où.
- **Scénario 2:** l'hydrogéologie locale est largement comprise et relativement cohérente mais présente quelques difficultés; des efforts s'imposent pour trouver une source souterraine fiable.

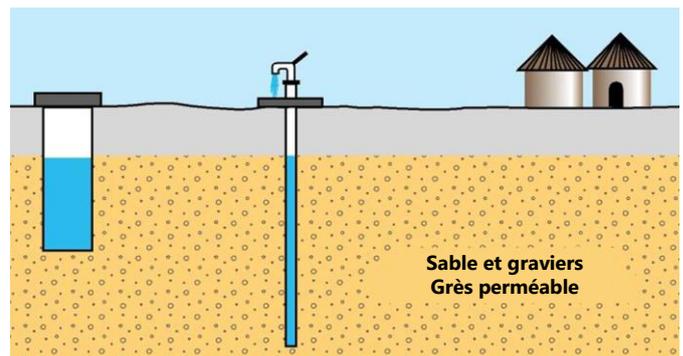
- **Scénario 3:** l'hydrogéologie locale est moins bien connue et comprise; elle est complexe et incertaine; il existe un risque élevé d'échec ou de forages peu productifs.

Figure 7: Trois scénarios de complexité croissante pour l'implantation d'un puits

Source: MacDonald *et al.* 2005

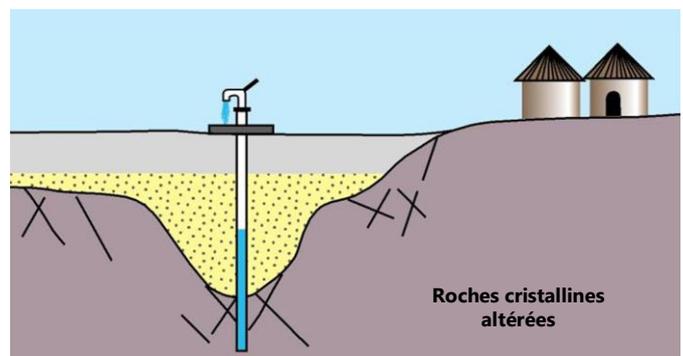
Scénario 1: Eau souterraine facile à trouver

Les forages et les puits peuvent être implantés n'importe où.



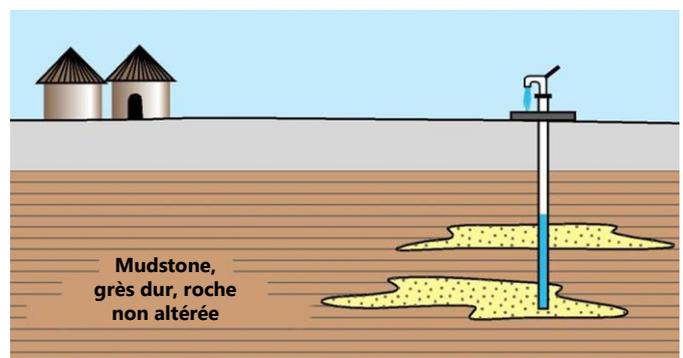
Scénario 2: L'hydrogéologie locale est comprise

Des techniques géophysiques interprétées au moyen de règles simples peuvent être utilisées pour l'implantation de forages.



Scénario 3: L'hydrogéologie est complexe

Il est difficile d'implanter des forages et des puits fonctionnels en utilisant des règles simples. Des prospections détaillées s'imposent.



Dans ces trois scénarios, la réussite de l'implantation exige un niveau croissant de compétences techniques, de main d'œuvre et de coûts, comme illustré dans le tableau 3.

Tableau 3: Scénarios d'implantation et besoins en ressources

Scénario	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Ressources			
Technique - organisation			
Étude théorique sur l'hydrogéologie	✓	✓	✓
Visite sur le terrain	✓	✓	✓
Analyse des risques	✓	✓	✓
Étude géophysique	-	?	✓
Question sociales			
Structure sociale et préférences de la communauté	✓	✓	✓
Temps et coûts			
Temps nécessaire	réduit	moyen	long
Coûts	faibles	moyens	élevés

Légende: ✓ à réaliser
 ? dépend du niveau de risque
 - non nécessaire

L'étude de cas présentée dans l'encadré 2 offre un exemple de la procédure d'implantation et des techniques utilisées en Ouganda par une entreprise opérant dans les conditions du scénario 2.

Il convient de mentionner les techniques divinatoires ou biomagnétisme humain parfois utilisées pour localiser l'eau souterraine à l'aide d'une baguette en bois ou en métal ou d'un autre ustensile. Généralement, la personne «sent» la présence de l'eau dans le sol, ou l'ustensile en bois ou en métal se met en mouvement au-dessus d'un endroit particulier. Malgré ses résultats prétendus, la radiesthésie ne repose sur aucune base scientifique. Il est donc recommandé de ne pas privilégier l'avis d'un sourcier par rapport à celui d'un hydrogéologue expérimenté.

4 Préparation de l'appel d'offres et des documents contractuels

La mission d'implantation constitue généralement la base de l'appel d'offres ultérieur visant à sélectionner l'entreprise chargée de la construction du forage. Si possible, l'implantation et le forage doivent être entrepris séparément, les travaux de forage intervenant après l'implantation. Dans certains cas, le consultant responsable de l'implantation sera ensuite chargé de superviser la mission de forage.

Il arrive que l'implantation et le forage soient intégrés au sein d'un même contrat. De fait, certains contrats font reposer la totalité du risque de forage non productif sur un seul entrepreneur qui est à la fois responsable de l'implantation et du forage. Cependant, cette pratique ne doit s'appliquer que si ce risque est très faible (scénario 1, section 3.4). Avant la préparation des documents d'appel d'offres, il faut décider si l'étude d'implantation et le forage seront entrepris sous contrat distinct ou sous un contrat unique.

La préparation des documents d'appel d'offres et des documents contractuels exige de:

- Définir le nombre de forage à implanter et à forer, et leur répartition géographique.
- Avoir une bonne compréhension du fonctionnement des eaux souterraines (section 1).

- Prendre en compte les exigences du forage (section 2) ainsi que les principaux facteurs sociaux, techniques et environnementaux (section 3.1).
- Exploiter toutes les sources d'information disponibles (section 3.2).
- Présélectionner les techniques d'implantation appropriées (section 3.3). Notez que l'*approche logique de l'implantation de forages* (section 3.4) vous oriente sur le choix des techniques d'implantation.

Encadré 2: Étude de cas d'implantation par Aquatech Enterprises (U) Ltd

En Ouganda, Aquatech Enterprises (U) Ltd respecte les procédures d'implantation suivantes:

La phase 1 est une étude de planification et de reconnaissance qui comprend la mobilisation de l'équipement et du personnel, le recueil et l'interprétation des données existantes et la présélection des zones cibles sur lesquelles seront menées des études détaillées. Elle comprend généralement aussi le recueil de données sur le terrain, l'analyse de données spécifiques au site, la vérification des résultats des études théoriques et la présélection du site.

Activités à mener durant cette phase:

- Mise en relation avec le client.
- Recueil et étude de la documentation et des rapports hydrogéologiques relatifs aux zones d'implantation envisagées.
- Collecte et étude des cartes (topographiques, géologiques et hydrogéologiques)
- Recueil et étude des informations et dossiers relatifs au forage.
- Visites sur le terrain pour évaluer les conditions, l'accessibilité des sites privilégiés et l'implication dont fait preuve la communauté.
- Utilisation d'un GPS pour localiser les sites sur une carte topographique.

Cela permettra d'obtenir des informations sur les sites susceptibles de receler de l'eau et sur la qualité de celle-ci.

La phase 2 comprend les études hydrogéologiques, notamment l'analyse des cartes topographiques et l'étude géophysique détaillée des zones intéressantes. Ces études utilisent principalement la technique de la résistivité pour caractériser les différentes formations. La majorité du territoire ougandais reposant sur des roches dures, un Terrameter 300C ABEM ou SAS 1000 est utilisé pour les profils électriques et sondages électriques verticaux. Ces méthodes fournissent a) une estimation de l'épaisseur du régo-lite, b) une indication de la nature des différentes couches de l'aquifère, et c) les emplacements des limites géologiques verticales.

Les données existantes concernant les sources d'eau avoisinantes sont recueillies et utilisées pour le calage. Lorsque les données ne sont pas disponibles, des sondages de calage sont effectués dans les puits/forages existants pour déterminer la géologie du sous-sol en termes de résistivité et de potentiel de production théorique de l'aquifère. Les résultats des mesures de calage orientent l'interprétation finale des données. Un traîné électrique est effectué pour évaluer la variation latérale chaque fois que cela s'avère nécessaire en fonction de l'environnement hydrogéologique local. Les anomalies identifiées à partir de l'étude sont ensuite étudiées au moyen de sondages pour vérifier la variation hydrogéologique selon la profondeur. Les profils de résistivité initiaux sont toujours réalisés perpendiculairement à la zone de fracture estimée.

Si le client ne dispose pas d'une expertise suffisante, un spécialiste doit être consulté. Il est irréaliste de penser qu'un client novice en la matière réussira à diriger correctement les consultants responsables de l'implantation ou les entreprises de forage, même si cela se produit souvent.

Le document d'appel d'offres doit inclure les points suivants:

- **Objectif(s)** de l'implantation.
- **Description** générale des conditions hydrogéologiques des zones d'implantation et des problèmes à anticiper.
- Information sur les **techniques** de prospection et d'implantation envisagées.
- Description claire des **produits** attendus, notamment une définition de l'ensemble des données géologiques et hydrogéologiques devant être étudiées et vérifiées lors de l'étude d'implantation (profondeur des aquifères, profondeur jusqu'à la nappe phréatique, transmissivité, etc.).
- Nombre et **emplacement** approximatif des sites, **usage de l'eau** et exigences en matière de **débit** et de **qualité de l'eau**.
- **Calendrier** général des travaux, délais et étapes.
- Définition claire des **rôles** et **responsabilités**.
- Estimation du nombre de réunions avec les clients. Les missions d'implantation peuvent nécessiter plusieurs cycles d'interprétation, de prospection et d'évaluation détaillée. Les réunions avec les clients sont nécessaires.
- Évaluation des **risques** associés à la mission. Les travaux peuvent être perturbés par les mauvaises conditions météorologiques, un accès routier difficile ou des troubles sociaux. Ces difficultés peuvent empêcher l'équipe d'accomplir leur tâche comme prévu. Les documents d'appel d'offres doivent définir précisément la procédure à suivre le cas échéant. Il peut arriver qu'aucun site convenable ne soit trouvé en raison de la complexité des conditions géologiques et hydrogéologiques. On peut distinguer trois niveaux de risque et leurs solutions (voir section 3.4 et annexe 1).
- Clarification des **procédures de paiement**. Très souvent, le paiement de la mission d'implantation est effectué après la réunion de débriefing avec le client, au cours de laquelle sont présentés les résultats, et la remise de la documentation finale. Une partie du paiement peut également être différée jusqu'à achèvement des travaux par le foreur. Si le forage échoue en raison d'un mauvais choix d'implantation, le solde du paiement de la mission d'implantation peut être définitivement retenu. Ces procédures doivent être clairement et expressément définies au préalable, dans les documents d'appel d'offres de la mission d'implantation.

Une estimation approximative des coûts doit être faite pour le travail d'implantation sur la base de ces informations. Celle-ci peut ensuite servir à comparer les prix des différentes offres.

La qualité de la mission d'implantation influe directement sur la qualité et le coût du travail des foreurs. Les termes de référence inclus dans les documents d'appel d'offres doivent donc être précis, complets et clairement rédigés. Ils doivent au minimum définir les objectifs de la mission, les services à exécuter par le consultant ou la société chargés de l'étude d'implantation, les tâches du client, les produits à délivrer, notamment le format des données, le calendrier et les normes de qualité.

Il est recommandé de joindre un modèle de contrat au dossier d'appel d'offres.

5 Passation de marchés et attribution du contrat

Les entreprises intéressées **soumettent une offre** basée sur les informations et les exigences mentionnées dans le dossier d'appel d'offres. Les offres doivent:

- Préciser la composition de l'équipe.
- Fournir des détails sur le matériel et les méthodes utilisées (ceux-ci peuvent être différents de ceux proposés dans l'appel d'offres).
- Mentionner l'expérience de l'entreprise.
- Fournir une brève analyse des risques accompagnée des mesures d'atténuation.
- Donner un calendrier approximatif des tâches à accomplir.

Les entreprises doivent **présenter une offre** en se basant sur des prix réalistes. Afin de proposer une offre financière raisonnable, le consultant ou la société doivent être au fait des délais établis, des critères d'admissibilité et de sélection, des termes de référence et des autres éléments contractuels. Toute imprécision dans le dossier d'appel d'offres doit être élucidée avant la soumission.

Figure 8: Sondage électrique vertical au Nigéria



La **procédure de passation de marchés** doit permettre au client de choisir la meilleure offre selon ses critères d'admissibilité et de sélection. Afin de garantir un processus équitable, il convient de suivre une procédure claire, telle que définie par le client ou le bailleur. Les critères d'admissibilité et de sélection ainsi que la procédure à suivre doivent être transparents, et précisés dans le dossier d'appel d'offres. Des normes et procédures formelles d'évaluation des marchés publics existent dans la plupart des pays.

Pour évaluer les offres, le client doit d'abord vérifier si le soumissionnaire satisfait aux critères d'admissibilité (licence, immatriculation en bonne et due forme de la société ou autres critères de pré-qualification). Si c'est le cas, il évaluera ensuite l'offre en fonction des critères de sélection prédéfinis et du prix.

L'évaluation de l'offre doit surtout prendre en compte l'expérience et l'expertise des principaux membres de l'équipe et les méthodes proposées plutôt que de se focaliser uniquement sur l'analyse du prix. Il est très rare que l'offre la plus compétitive soit la plus intéressante. Généralement, la meilleure offre est celle qui propose le meilleur rapport qualité/prix.

En cas de mission complexe, il est recommandé de demander **l'avis de spécialistes** pour évaluer les offres.

Après évaluation des offres et attribution du marché, le travail peut commencer.

6 Travail sur le terrain et gestion du contrat

Après signature du contrat, le client et l'entreprise chargée de l'implantation planifient le déroulement de la mission, notamment la communication entre les deux parties et les rencontres avec la communauté.

L'entreprise peut ensuite commencer la mission. Le client nomme le chef de projet, également responsable de l'assurance qualité. L'entreprise/l'équipe chargée de l'implantation recueillera et analysera les informations disponibles, contactera les sous-traitants (par exemple, pour l'étude géophysique) et mettra en place le personnel et la logistique. Le client et l'entreprise devront échanger leurs informations, décisions et documents tout au long de la mission. Le processus d'implantation consiste souvent en l'exécution répétitive de certaines tâches notamment:

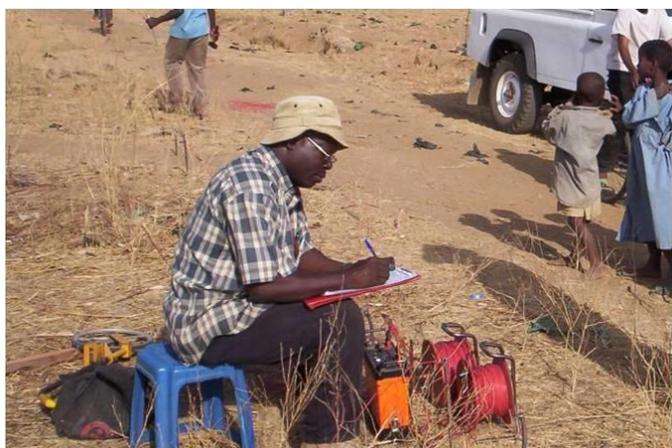
- Analyse critique des données (travail de bureau).
- Compilation d'un premier modèle hydrogéologique conceptuel de la ou des zones (travail de bureau).
- Visites sur le terrain, connaissance et savoir-faire local, essai de forage.
- Facultatif: perfectionnement du modèle conceptuel, vérification des données notamment celles sur la qualité de l'eau.
- Mesures géophysiques sur le terrain, rencontres avec les usagers, les propriétaires fonciers, les autres acteurs ou intervenants.
- Vérification, perfectionnement du modèle conceptuel, analyse des risques.
- Sélection des sites recommandés.
- Documentation (incluant une réunion de débriefing).

Certaines de ces étapes peuvent être combinées en fonction de la complexité de la mission.

Si des questions, des contraintes ou des problèmes surgissent, il est conseillé de contacter le client dès que possible.

Il est très important que la documentation compilée lors de la phase préparatoire et du travail de terrain soit exhaustive. L'entreprise comme le client doivent développer des capacités suffisantes (savoir-faire, ressources informatiques) pour pouvoir échanger toutes leurs données de façon efficace.

Figure 9: Sondage électrique vertical au Nigéria



7 Paiement, suivi et documentation

Le paiement des services d'implantation doit respecter le contrat signé. Souvent, les paiements sont effectués au fur et à mesure de l'achèvement des étapes intermédiaires, et après approbation des résultats par le client. En cas de non-conformité, il est parfois nécessaire de recourir à un arbitrage.

Le client doit renforcer ses capacités et ressources internes afin de pouvoir gérer les données de la mission d'implantation et les soumettre à l'autorité compétente, par exemple, le service géologique national ou l'autorité de gestion des eaux souterraines.

La passation du marché de forage sera basée sur les données recueillies au cours de la mission d'implantation.

8 Conclusions et recommandations

L'étude d'implantation consiste à prospecter le terrain et à identifier les ressources en eau pour des usages spécifiques. L'usage qui en sera fait aura une incidence sur le niveau de la nappe, et risque d'interférer avec les autres usages de l'eau à proximité. La planification et la mise en œuvre des activités d'implantation doit donc en tenir compte.

Comme le montre cette note pratique, l'étude d'implantation est beaucoup plus qu'une procédure technique et comporte des aspects sociaux très importants. L'implantation s'inscrit dans une série d'activités qui débutent par la sélection des communautés et se terminent par l'exploitation et l'entretien de l'installation.

La complexité de l'hydrogéologie influe notablement sur le choix des combinaisons de techniques d'implantation, et de prospection le cas échéant, à déployer. Afin d'établir une base solide en vue de l'exploration des ressources en eau souterraine destinées à l'approvisionnement en eau, nous recommandons une approche par étapes, comme indiqué dans cette note pratique, qui commence par la compréhension élémentaire des eaux souterraines et l'élaboration d'un modèle simple.

Le Code de bonnes pratiques pour la réalisation de forages (RWSN 2010) énonce neuf grands principes relatifs à la planification et à la réalisation des forages; l'implantation est l'un de ces grands principes. Les efforts visant à renforcer la performance des activités d'implantation doivent donc prendre en compte le cadre plus large du Code de bonnes pratiques afin de garantir l'utilisation durable des eaux souterraines, que ce soit pour l'approvisionnement ou pour d'autres usages.

Certains pays ont fait des efforts considérables pour mettre en place les ressources humaines nécessaires, établir des procédures de travail claires et développer des outils (notamment des cartes des eaux souterraines). Cependant, il reste encore beaucoup à faire. Malheureusement, de nombreux pays ne possèdent pas les ressources humaines et les compétences suffisantes pour gérer ou entreprendre une étude d'implantation. Un renforcement important des capacités est donc nécessaire. Il reste également des progrès à faire concernant la gestion des données, notamment leur mise à jour systématique.

Annexe 1 Modèle de catégorisation des risques et structures de paiement

Le tableau ci-dessous fournit un modèle de classification des risques de forage négatif et prévoit des structures de paiement appropriées. Il propose une approche utilisant différentes modalités contractuelles et de paiement, en fonction de ce risque. Dans tous les cas, l'entrepreneur est responsable de la réussite du forage. Il convient de noter que ce modèle n'a pas de but normatif, mais fait

partie des méthodes possibles pour traiter l'un des principaux problèmes de l'activité de forage, à savoir le risque de forages négatifs. Il existe une autre méthode où le client assume la responsabilité de l'implantation et paye l'entrepreneur en fonction du bordereau de prix unitaires inclus dans le devis quantitatif et estimatif pour tous les forages, qu'il soit productifs ou négatifs.

Dans un pays ou une région particulière, il est possible de classer le potentiel de forage en trois catégories (ou plus) selon le tableau ci-dessous.

Catégorie	Taux de réussite*	Hypothèses	Dispositions proposées en matière de paiement
A Grandes chances de réussite	> 75 %	Il n'est pas nécessaire de mener une étude géophysique. Le forage offre de fortes chances de réussite, quel que soit le site retenu. Le site retenu en priorité par la communauté ou le propriétaire a toutes les chances d'être un succès.	Le risque de forage négatif est défini comme faible et le coût d'un forage négatif n'est payé sous aucun prétexte à l'entreprise. Le foreur doit choisir un site au sein des zones désignées par la communauté, et ses taux unitaires doivent inclure le risque de forage négatif.
B Chances modérées	50 % - 75 %	Le foreur (ou un hydrogéologue préalablement désigné) peut choisir de mener une étude d'implantation et de sélectionner le site de forage parmi les zones choisies par la communauté, conformément aux directives gouvernementales applicables. Dans certains cas, il est souhaitable de spécifier une profondeur minimale de forage dans le contrat.	Versement limité à l'entrepreneur pour des forages négatifs d'une certaine profondeur, selon les conditions suivantes: <ul style="list-style-type: none"> ■ 1^{er} forage réussi: payé en intégralité; déplacement vers le site suivant. ■ Si le 1^{er} forage est négatif: aucun paiement. ■ 2^e forage réussi: payé en intégralité; déplacement vers le site suivant. ■ Si le 2^e forage est négatif: calcul et paiement d'un juste pourcentage du coût d'un forage productif correspondant aux travaux réalisés, ou paiement selon le devis quantitatif. ■ 3^e forage réussi: payé en intégralité; déplacement vers le site suivant. ■ Si le 3^e forage est négatif: calcul et paiement d'un juste pourcentage du coût d'un forage productif correspondant aux travaux réalisés, ou paiement selon le devis quantitatif. Déplacement vers la communauté suivante. <p>Si trois forages se sont soldés par un échec, aucun autre forage n'est entrepris dans la communauté jusqu'à ce que des prospections complémentaires soient réalisées. En effet, cet endroit deviendra désormais un site de catégorie C et l'employeur devra commanditer une étude hydrogéologique spécialisée afin de définir le ou les sites destinés à un nouveau forage.</p>
C Peu de chances de réussite	< 50 %	Le client commandite une étude d'implantation indépendante, incluant l'utilisation de cartes, la télédétection et l'étude géophysique (étude de la résistivité et évaluation électromagnétique). Les sites choisis par le consultant doivent être forés par l'entrepreneur à la profondeur minimale indiquée.	Le client a déterminé l'emplacement et la profondeur réels; le paiement est effectué aussi bien pour les forages réussis que pour les forages négatifs.

* Les pourcentages proposés ci-dessus peuvent varier en fonction des conditions locales.

Références et bibliographie

- ADEKILE, D., (2014), *Passation de marchés et gestion des contrats de construction de forages – Guide à l'intention des superviseurs et chefs de projet*, Rural Water Supply Network (RWSN), St Gallen, Suisse.
- ADEKILE, D., (2014), *Supervision des forages d'eau potable, Guide à l'intention des superviseurs*, Rural Water Supply Network (RWSN), St Gallen, Suisse.
- ARGOSS, (2001), *Guidelines for assessing the risk to groundwater from on-site sanitation*. Rapport n° CR/01/142. ministère britannique du Développement international (DFID), Royaume-Uni, consultable à l'adresse: <http://www.research4development.info/PDF/Outputs/R68691.pdf> [consulté le 28 juin 2010].
- DANERT, K., LUUTU, A., CARTER, R.C., OLSCHESKI, A., (2014), *Analyse des coûts et détermination des prix – Guide à l'intention des entreprises de forage d'eau*, Rural Water Supply Network (RWSN), St Gallen, Suisse.
- État de l'Oregon, (2010), *Groundwater Stewardship in Oregon: Groundwater and Wells. Cone of Depression*, consultable à l'adresse: <http://groundwater.oregonstate.edu/groundwater/html/GroundwaterWells.htm> [consulté le 21 juin 2010].
- FETTER, C.W., (2001), *Applied Hydrogeology*, 4^e édition. Prentice Hall, Inc.
- FETTER, C.W., (2010), *Home Page for Applied Hydrogeology*, consultable à l'adresse: <http://www.appliedhydrogeology.info> [consulté le 23 juin 2010].
- FUREY, S., (2014), *Développement de l'accès durable à l'eau souterraine: utilisation, protection, amélioration*, Rural Water Supply Network (RWSN)
- MACDONALD, A., DAVIES, J., CALOW, R. et CHILTON, P.J., (2005), *Developing groundwater: a guide for rural water supply*. ITDG Publishing.
- MISSTEAR, B., BANKS, D., et CLARK, L., (2006), *Water wells and boreholes*. Wiley.
- OMS, (2008), *Directives pour la qualité de l'eau de boisson, Volume 1 Recommandations*, Organisation mondiale de la Santé, Genève, Suisse, consultable à l'adresse: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/gdwq3rev/en/index.html [consulté le 25 juin 2010].
- OMS/UNICEF, (2010), *Programme commun OMS/UNICEF de surveillance de l'eau et de l'assainissement*, consultable à l'adresse: <http://www.wssinfo.org> [consulté le 21 juin 2010].
- PRICE, M., (1996), *Introducing Groundwater*, 2^e édition, Chapman et Hall.
- RWSN, (2009), *Hand Drilling Directory*, Rural Water Supply Network (RWSN), consultable à l'adresse: <http://www.rural-water-supply.net/en/resources/details/156> [consulté le 25 juin 2010].
- DANERT, K., ARMSTRONG, T., ADEKILE, D., DUFFAU, B., OUEDRAOGO, I. et KWEI, C., (2010), *Code de bonnes pratiques pour la réalisation de forages*, version français, Rural Water Supply Network (RWSN), St Gallen, Suisse.
- TODD, D.K., et MAYS, L.W., (2005), *Groundwater Hydrology*. 3^e édition, Wiley.
- UNESCO, (2009), *L'eau dans un monde qui change*, 3^e Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau (WWDR3), Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, consultable à l'adresse: <http://www.unesco.org/new/fr/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr3-2009/>.
- VAN DONGEN, P. et WOODHOUSE, M., (1994), *Finding groundwater: a project manager's guide to techniques and how to use them*. BIRD/Programme Water and Sanitation de la Banque mondiale, Washington, consultable à l'adresse: http://www-esd.worldbank.org/esd/ard/groundwater/pdfreports/Finding_gdwtr_Proj_mangrs_Guide.pdf.

À propos des auteurs

Richard Carter, responsable de l'assistance technique à WaterAid, consultant et universitaire, a travaillé avec des gouvernements et des ONG dans de nombreux pays d'Afrique et d'Asie du Sud dans le domaine de l'exploitation des eaux souterraines. **John Chilton** a acquis une vaste expérience de l'exploitation des eaux souterraines au cours de sa carrière au British Geological Survey. Il est aujourd'hui directeur exécutif de l'Association internationale des Hydrogéologues. **Kerstin Danert**, membre de la Fondation Skat et coordinatrice du thème phare du RWSN «Forages à coûts réduits», a une connaissance approfondie des institutions privées et publiques d'approvisionnement en eau. **André Olschewski**, membre de la Fondation Skat, possède une vaste expérience des procédures de passation des marchés dans les domaines du forage et de l'ingénierie d'entreprise.

Contact



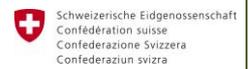
Le Réseau pour l'approvisionnement en eau en milieu rural (RWSN) est un réseau mondial de connaissances pour la promotion de pratiques saines d'approvisionnement en eau en milieu rural.

RWSN Secretariat
Skat Foundation
Vadianstrasse 42
CH-9000 St Gallen
Suisse

Tél.: +41 71 228 54 54
Fax: +41 71 228 54 55
E-mail: ruralwater@skat.ch
Site: www.rural-water-supply.net

Soutien et révision

La présente note pratique a été préparée grâce au soutien de l'UNICEF, de l'USAID et de la Fondation Skat dans le cadre de l'élaboration du Code de bonnes pratiques pour la réalisation de forages. Le «Water and Sanitation Programme» de la Banque mondiale et la Direction du développement et de la coopération (DDC, Suisse) ont financé la coordination du thème phare du RWSN «Forages à coûts réduits».



skat_foundation



Ce document a été révisé par le Dr. Alison Parker (Cranfield University), Ingrid Carlier (Natural Resources International) et le Dr. Peter Harvey (UNICEF). Le processus de révision a été soutenu par DEW Point, le Centre de ressources et développement pour l'environnement, l'eau et l'assainissement, financé par le ministère britannique du Développement international (DFID) Nous tenons à exprimer notre reconnaissance pour ces contributions.

Photos reproduites avec l'aimable autorisation de Dotun Adekile.

ISBN: 978-3-908156-54-3