

JR

Bibl. Centrale

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

LE FORAGE D'EAU

GUIDE PRATIQUE DES MAITRES D'OUVRAGES

SGN/DOC
Bibliothèque

Département hydrogéologie



80 SGN 159 HYD

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

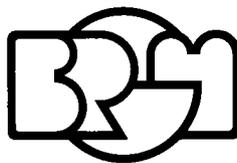
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

LE FORAGE D'EAU

GUIDE PRATIQUE DES MAÎTRES D'OUVRAGES

par

J. PERSON



Département hydrogéologie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

80 SGN 159 HYD

Avril 1980

A V A N T - P R O P O S

Le colloque national tenu en octobre 1977 sur "Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France" avait, entre autres sujets, examiné les problèmes posés par les techniques d'exploitation des eaux souterraines.

Il était alors remarqué que des opérations importantes, telles que les diagraphies, les cimentations ou les travaux de développement, étaient rarement bien conduites.

De plus, l'exploitation des eaux souterraines est souvent freinée par la crainte des aléas que présente l'exécution des travaux.

La connaissance des méthodes et des moyens susceptibles d'y remédier devrait renforcer la confiance qu'il convient d'accorder à la mise en oeuvre de techniques s'inscrivant dans une meilleure application des règles de l'art.

Ce mémento des forages d'eau n'est pas particulièrement destiné aux *Spécialistes* de la recherche et du captage des eaux souterraines. Ils *y retrouveront des informations qui devraient intéresser principalement leurs interlocuteurs maîtres d'ouvrages.*

S O M M A I R E

	Pages
RESUME	
INTRODUCTION	1
ELABORATION DES PROJETS	2
DIRECTION DES TRAVAUX	3
QUALIFICATION DES ENTREPRISES	3
CONDITIONS D'EXECUTION DES TRAVAUX	4
SONDAGES DE RECONNAISSANCE	5
CONSTRUCTION DES OUVRAGES	6
Implantation	6
Techniques de foration	6
Fluide de circulation	9
Prélèvement d'échantillons	10
Equipement du forage	11
Tubage	11
Crépines	13
MISE EN PRODUCTION DES OUVRAGES	15
Développement	15
Par exhaure	16
Par traitement chimique	16
Par fracturation	17
Filtres	17
POMPAGES D'ESSAI	18
PROTECTION DE LA RESSOURCE	19
Cimentation en tête	19
Cimentation du corps de l'ouvrage	20
ANALYSES D'EAU	21
DURABILITE DES OUVRAGES	22
Corrosion	23
Incrustations	24
PROGRAMMES D'AUSCULTATION	25
Résistivité	25
Différences de potentiel	25

Rayons gamma	26
Vitesse de circulation de l'eau	26
Récapitulation	26
DESINFECTION DES OUVRAGES TERMINES	30
OUVRAGES ABANDONNES	30
ENCADREMENT DES PRESTATIONS D'ENTREPRISES	30
Conduite des chantiers	30
Règlement des travaux	31
Modification des conditions d'exécution	32
Données techniques	32
Révision des prix	32
Responsabilités et garanties	32
REGLEMENTATION	33
TERMES TECHNIQUES EMPLOYES EN FORAGES D'EAU	35
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39

°
° °

FIGURES :

Exemples de profils de forage et de plans de tubage (Fig. 1)	12
Diagraphie en forage d'eau (Fig. 2)	29

R E S U M E

Les techniques d'exploitation des eaux souterraines peuvent bénéficier de progrès importants qui ne paraissent pas encore suffisamment mis en application.

Le colloque national tenu en octobre 1977 sur "Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France" avait souhaité que les maîtres d'ouvrages en soient mieux informés.

Le document intitulé "Le forage d'eau - guide pratique des maîtres d'ouvrages" s'est donné pour but d'en rappeler l'essentiel.

Il n'a pas pour prétention de détailler chacune des interventions qui s'avèrent nécessaires. Aux spécialistes, il n'apportera qu'un rappel de connaissances et de techniques qui leurs sont familières. Les textes de référence sont d'ailleurs mentionnés en bibliographie.

Par contre, les maîtres d'ouvrages devraient y trouver les raisons qui conduisent à améliorer les pratiques courantes dans des domaines tels que : la réalisation des diagraphies, les cimentations, les méthodes de développement, les pompages d'essai, etc..

Cette synthèse a été dressée dans le cadre des études méthodologiques du département de l'Eau, sur crédits du ministère de l'Industrie.

I N T R O D U C T I O N

La construction des forages d'eau bénéficie sans aucun doute de progrès continus, grâce notamment aux acquisitions obtenues dans le domaine voisin de la recherche pétrolière.

L'expérience montre cependant que les travaux menés sur le terrain n'utilisent que rarement toutes les ressources offertes par la technique.

Pour en donner la raison, on invoque trop facilement les dépenses supplémentaires que ne manqueraient pas de provoquer des interventions très élaborées.

Cet argument n'est pas convaincant, ne serait-ce qu'en raison de la disproportion entre les frais à engager pour extraire l'eau de son gîte avec des moyens efficaces et le montant des investissements de surface nécessaires à l'utilisation de cette eau. Il apparaît que le surcoût d'un forage bien construit n'apporte le plus souvent qu'un accroissement infime de dépenses d'équipement.

En fait, le véritable problème réside pour l'essentiel dans le recours à des spécialistes qualifiés.

La préparation des projets doit être menée de façon à réduire au mieux les risques d'incertitudes.

La conduite d'un chantier de forage oblige à bien connaître et à maîtriser les moyens d'exécution.

Le matériel et les méthodes utilisés en forages d'eau sont décrits dans des publications nombreuses.

Nous avons cité en bibliographie les titres qui nous paraissent intéressants à consulter.

En ce qui concerne les relations entre maîtres d'ouvrages, maîtres d'oeuvre et entrepreneurs, elles sont souvent ambiguës, employant d'ailleurs une formule commode mais particulièrement mal définie qui est celle de la conformité aux règles de l'art.

Il faudrait pour le moins préciser ce qu'elle signifie, en rapport avec l'évolution des techniques.

Nous nous y efforcerons en présentant ci-après un mémento dont la seule ambition serait de contribuer à la pratique des règles de l'art en vue d'une exploitation rationnelle des eaux souterraines.

Nous ne ferons que mentionner les matériels et nous nous attacherons à rappeler les moyens de mise en production des ouvrages et de protection de la ressource.

ELABORATION DES PROJETS

En raison de sa formation, de ses connaissances et de la documentation dont il dispose, l'hydrogéologue est mieux placé que quiconque pour établir l'architecture de l'ouvrage en prenant en compte :

- la nature et la géométrie des aquifères,
- les horizons à capter ou à étancher,
- les procédés de captage et d'essais de nappes,
- les répercussions des prélèvements sur les ouvrages existants,
- les conditions d'exploitation liées aux caractéristiques des aquifères, et aux possibilités de renouvellement de la ressource en eau,
- les risques de pollution provenant d'eaux superficielles ou souterraines,
- les dangers de mettre en communication inconsidérément différents niveaux aquifères et les moyens d'y remédier.

etc..

La coupe géologique permettra de fonder le programme des travaux.

Après avoir précisé l'objectif de l'opération, localisé son emplacement ainsi que les caractéristiques du sous-sol au droit de l'ouvrage projeté, les spécifications techniques porteront sur les différentes opérations (foration, prélèvements d'échantillons, tubages, crépines, cimentation, développement, essais, etc..), préciseront les moyens à employer, la capacité des engins de chantier, etc..

L'auteur du projet veillera à interdire l'utilisation de matériels périmés ou de modes d'exécution inadaptés. Il apportera toutes précisions concernant le profil du forage et le plan de tubage :

- longueurs et diamètres des différentes parties du forage,
- longueurs et diamètres des colonnes de tubes,
- pompes correspondant aux débits et pressions du fluide de circulation,
- vitesses d'avancement prévisibles, etc..

Les entreprises consultées disposeront ainsi des renseignements complets et détaillés qui leur permettront d'établir leur offre.

Pour les travaux qui présentent des difficultés exceptionnelles, les entreprises peuvent être amenées à envisager un choix de méthodes d'exécution résultant de la confrontation des difficultés de terrains, des caractéristiques des ouvrages projetés (diamètres - profondeurs), de la qualification de leur personnel, de la nature des matériels dont elles disposent.

Dans ce cas, le lancement d'un concours peut présenter un grand intérêt; il permet de comparer les méthodes susceptibles d'être proposées, tant du point de vue prix que modalités d'exécution, mais le programme doit en être parfaitement établi en éliminant tous risques d'omissions qui conduiraient à des plus-values en cours d'exécution.

Il portera tant sur la coupe prévisionnelle de l'ouvrage, les terrains à traverser, les niveaux d'eau et débits escomptés, que sur les éléments de la complétion.

DIRECTION DES TRAVAUX

En matière de forages d'eau, la direction des travaux exige une parfaite connaissance des techniques de foration, d'équipement et de complétion ainsi que des précautions à prendre pour éviter la dégradation aussi bien quantitative que qualitative des ressources en eau et des méthodes à appliquer pour mener à bonne fin les interventions des entreprises dans tous ces domaines.

Le maître d'oeuvre devra en cours de chantier procéder aux réajustements imposés par les imprévus et en suivre l'exécution.

Les capacités qui lui sont demandées sont très spécifiques.

Elles dépendent à la fois de connaissances théoriques et pratiques qui lui permettent en fonction des matériels employés et des méthodes de travail d'apprécier objectivement par exemple :

- la dureté et la tenue d'un terrain,
- les causes d'altération d'un fluide de circulation,
- les difficultés de prélèvements et de remontée d'échantillons,
- les risques de rupture sur un train de tiges ou une colonne de tubes,
- les pertes de boue ou les causes de colmatage,
- les conditions d'une bonne cimentation, d'un bon gravillonnage, etc..

Une méconnaissance de ces problèmes ne peut qu'accroître les risques d'échecs en cours de travaux.

QUALIFICATION DES ENTREPRISES

La spécialisation du personnel de chantier et son expérience des forages d'eau sont des éléments très importants de la qualification des entreprises.

Le travail doit être mené par une équipe bien formée que conduit un foreur expérimenté.

L'entreprise est tenue d'équiper et d'approvisionner son chantier en matériel parfaitement adapté à la réalisation des travaux qui lui sont confiés.

Une attention particulière doit être portée à la description des moyens d'exécution que l'entreprise joint à son offre, afin d'éliminer

les propositions d'un moindre prix qui correspondraient à l'utilisation d'un matériel déclassé.

L'obligation qui est faite à l'entreprise de répondre rapidement aux situations susceptibles de se présenter ne doit pas être considérée comme une clause de style. Il est très important de prévoir les délais d'approvisionnement des moyens complémentaires qui s'imposeraient inopinément en cours de travaux.

Il faut éviter que le matériel et les équipes soient immobilisées inutilement, les moteurs tournant pour maintenir une lente circulation du fluide de forage.

Ces arrêts coûtent cher ; leur prise en charge sera toujours la cause de litiges avec l'entreprise.

CONDITIONS D'EXECUTION DE TRAVAUX

La construction des forages d'eau présente une grande diversité de situations résultant :

- de l'hétérogénéité des terrains,
- de la variabilité de leur résistance mécanique,
- des caractéristiques des aquifères rencontrés,
- des débits recherchés.

Si on lui en laisse le choix, l'entrepreneur sera enclin à proposer l'équipement dont il dispose le plus facilement, sans être assuré de son adaptation aux difficultés qui pourront être rencontrées.

Deux hypothèses sont à envisager :

- Les données de base, géologiques et hydrogéologiques, ne sont connues qu'approximativement.

Cette estimation peut entraîner toute une série de modifications en cours d'exécution, résultant par exemple de changements de diamètres causés par une mauvaise tenue des terrains rencontrés, etc..

Le maître d'ouvrage se réserve alors le droit d'augmenter ou de réduire l'importance des prestations d'entreprise.

Une telle situation, fréquemment rencontrée, est aventureuse pour l'exécution des travaux. Elle est la cause de difficultés au règlement.

Pour rester acceptables, les augmentations ou réductions de prestations doivent rester dans une marge de plus ou moins 10 % à 15 % des profondeurs à atteindre dans un diamètre donné, des longueurs de tubage à installer, etc..

Cette marge conduit les entreprises à majorer leurs prix, couvrant ainsi une modification des conditions d'exécution qui leur serait imposée en cours de travaux.

- Le sous-sol à forer est parfaitement connu.

Des relevés fiables ont été effectués lors de la construction d'ouvrages similaires.

L'étude nouvelle pourra être conduite avec précision, en apportant toutes chances de correspondre à la réalité en cours de travaux.

Afin de réaliser convenablement les forages d'eau et d'aboutir à une bonne exploitation de la ressource, la seule méthode valable consiste à passer au mieux de la première à la seconde hypothèse.

Des moyens d'investigation sont offerts par les campagnes de prospection géophysique et par des observations de terrain, telles que la photo-interprétation particulièrement utile dans le cas d'implantation d'ouvrages en milieu fracturé.

Les caractéristiques complètes d'un site aquifère ne peuvent être obtenues que par l'exécution de sondages de reconnaissance.

L'exécution de ces sondages doit être traitée séparément du chantier des forages d'exploitation qu'elle précède.

Elle permet, s'il y a lieu, d'étalonner les résultats de campagnes de prospection géophysique.

SONDAGES DE RECONNAISSANCE

Les travaux ont pour but :

- de reconnaître et de localiser les séries stratigraphiques qui constituent le sous-sol,
- de déterminer le positionnement de niveaux aquifères,
- de constater le débit et la qualité des eaux,
- de choisir le mode d'isolement des niveaux aquifères qui sont à éliminer,
- d'examiner les moyens de captage les mieux adaptés à la réalisation des forages d'exploitation (types et longueurs de crépines - granulométrie de massifs filtrants, etc..).

Ces ouvrages doivent permettre de petits pompages d'essai et le prélèvement d'échantillons d'eau.

La technique appliquée pour leur exécution ne diffère pas sensiblement de celle qui est employée pour les forages d'exploitation.

Le diamètre sera choisi en fonction des renseignements à obtenir, tout en recherchant des conditions de réalisation aussi économiques que possible.

Un diamètre de 4" suffit pour effectuer une prise d'échantillon et un prélèvement d'eau mais un diamètre supérieur pourra être exigé par une mesure de débit ou pour assurer la fiabilité de l'interprétation qui sera faite.

Le sondage de reconnaissance peut être transformé par alésage en forage d'exploitation, ce qui présente un réel avantage si son implantation en milieu karstique ou cristallin correspond précisément à l'emplacement d'une fissure productive.

Cette éventualité doit être mentionnée avant les travaux. Le foreur sera ainsi en mesure de prévoir les moyens d'exécution et équipements d'une force suffisante pour effectuer les élargissements qui lui seraient demandés.

Après usage, les sondages de reconnaissance peuvent être colmatés, en prenant soin d'éviter toute pollution provenant d'eaux superficielles ou de mise en communication de différents niveaux aquifères. Le plus généralement, ils sont conservés comme piézomètres, rapprochés ou éloignés du puits de captage, pour effectuer des relevés du niveau de la nappe, aussi bien à la baisse en cours de pompage qu'en remontée après pompage.

CONSTRUCTION DES OUVRAGES

Implantation

La localisation des travaux sur le terrain résulte de l'étude hydrogéologique préliminaire du projet.

Les installations existantes (canalisations souterraines, égouts, câbles) dont la présence constituerait une gêne au déploiement du matériel et à l'exécution de l'ouvrage seront soigneusement repérées et les modifications éventuellement nécessaires figureront au montant des dépenses à prévoir.

L'implantation du projet prendra en compte :

- l'autorisation d'occuper les lieux, de forer et d'exploiter,
- les contraintes résultant s'il y a lieu de l'établissement des périmètres de protection,
- les possibilités d'accès et le voisinage,
- la facilité d'assurer l'approvisionnement en eau du chantier, d'évacuer les déblais et les eaux de pompage.

Techniques de foration

Le projet doit prévoir les moyens de réalisation ainsi que les techniques de foration qui assureront la construction de l'ouvrage aux caractéristiques imposées (profondeur - diamètre de départ - diamètres intermédiaires - diamètre inférieur).

Le débit recherché fixera ces caractéristiques en rapport avec le diamètre du tubage qui permet de placer le type de pompe à prévoir, donc de mettre en concordance l'équipement du forage et le débit à en extraire.

Cette conception ne laisse aucun choix à l'entreprise. Elle nécessite une parfaite connaissance des difficultés de chantier qui pourront être rencontrées.

Une autre façon de procéder consiste, nous l'avons dit, à offrir aux entreprises une plus grande liberté en ouvrant un concours ; elle ne peut qu'être génératrice de progrès pour la mise en oeuvre de techniques nouvelles.

En fait, chaque matériel possède des qualités et des défauts qui fixeront le choix :

Forages par percussion

- Le battage aux tiges est une méthode démodée. Toutefois, la foration au battage avec des trépanes lourds de formes diverses, faciles à entretenir en état de marche par recharge et affûtage sur le chantier, peut encore être appliquée avec succès pour traverser en grand diamètre des terrains fissurés ou très durs à frais réduits ; avec les tiges, il est à la fois possible de forer "à sec" ou avec circulation de boue pour remonter les déblais en dehors des horizons aquifères fissurés.
- Le battage au câble (câble tool), encore dénommé forage à sec, est une des plus anciennes méthodes, d'exécution lente, mais requérant peu de puissance, n'employant pas de fluide de circulation, évitant donc de colmater le terrain et obtenant ainsi la meilleure productivité.

Méconnu, ce matériel mériterait d'être réhabilité en raison des avantages qu'il procure pour l'exécution des forages d'eau de profondeur moyenne.

Les terrains plastiques limitent son emploi, ainsi que les terrains bouillants qui nécessitent des tubages de soutènement.

Forage par rotation (rotary)

Ce mode de forage est le plus couramment employé en travaux profonds. L'avancement s'effectue par la double action du poids appliqué à l'outil et du mouvement tournant auquel cet outil est soumis.

Il présente l'inconvénient de nécessiter l'emploi d'un fluide de circulation qui provoque le colmatage des petites fissures dans les terrains à faible pression d'eau.

En circulation directe, le fluide est injecté par l'intérieur des tiges et à travers les outils ; les déblais remontent entre les tiges et la paroi forée. En circulation inverse, la boue est pompée dans l'espace annulaire pour faire remonter le fluide et les déblais à l'intérieur du train de tiges.

Cette seconde méthode est utilisée en grand diamètre pour nettoyer le fond au forage sans avoir à développer une puissance trop importante.

Forage par marteau "fond de trou"

Ce procédé allie en fait les techniques par percussion et par rotation. L'air provenant d'un compresseur est injecté sous forte pression à travers le train de tiges pour commander à son extrémité un marteau pneumatique muni d'un taillant.

Un tel mode de forage est limité par :

- l'impossibilité d'employer le marteau pneumatique en terrain plastique ;
- la nécessité d'une bonne tenue des parois, ce qui élimine les terrains présentant un risque d'érosion ;
- la difficulté de guider l'outil pour assurer un avancement linéaire ;
- la puissance du compresseur dont dépend la profondeur qui peut être atteinte.

Le marteau fond de trou permet une grande vitesse d'avancement, en terrain dur, à petit diamètre et jusqu'à une profondeur usuelle de l'ordre de 150 m.

Forage par louvoisement

C'est un forage par curage, le louvoisement intervenant pour faciliter la manoeuvre des tubes de soutènement.

De puissants vérins exercent des couples alternatifs sur le tubage qui descend grâce à son poids (épaisseur supérieure à 10 mm) et au tranchant placé à la base du premier tube.

Le tubage est vidé progressivement à la cuillère ou à la soupape, offrant ainsi la possibilité d'examiner facilement les débris.

La crépine et son massif captant sont mis en place et la machine permet d'arracher le tube de fonçage, toujours par louvoisement.

Cette méthode de travail convient bien au forage de formations meubles. Elle permet une exécution rapide à faible profondeur, notamment en terrain alluvionnaire ne comportant pas d'éléments grossiers qui retarderaient ou interdiraient l'avancement.

Son emploi est limité par la rencontre de terrains durs ou par la friction des tubes de soutènement.

L'utilisation de tubes doubles-parois, lisses intérieurement et extérieurement, facilite la descente mais accroît le poids mis en oeuvre.

Forage par godet à clapet

L'outil est un "bucket" ou godet à clapet, pénétrant dans le sol et remplissant le cylindre qui le constitue.

Le travail se fait soit par battage en terrain dur soit par rotation en terrain meuble.

En cas de pénétration facile, la vitesse de descente et le lissage par l'outil peuvent assurer la tenue des parois sans qu'il soit nécessaire de tuber à l'avancement.

Les forages de reconnaissance utilisent le même matériel moteur avec un godet plus petit.

L'une et l'autre de ces deux dernières méthodes s'apparentent à la construction des puits, l'emploi d'engins mécaniques procurant des performances très intéressantes.

A titre d'information, nous signalerons comme nouveaux venus sur le marché des matériels de forage :

Le flexoforage utilisant un long flexible pour soutenir un moteur de fond et l'outil.

Le turboforage, consistant à mettre en rotation, par le fluide de circulation, une turbine à étages multiples.

Ces matériels coûteux sont utilisés en forages pétroliers et pour l'exécution de forages déviés.

°
° °

Les matériels de forage sont destinés à établir une foration rectiligne, de telle sorte que, à la pose du tubage, la colonne soit bien centrée.

En fait, un forage ne peut être ni totalement rectiligne ni totalement vertical.

Le directeur des travaux procédera en cours de forage à des contrôles de verticalité en utilisant des appareils modernes, inclinomètres ou direction-mètres, pour les ouvrages importants.

Les déviations lentes et progressives peuvent être admises, par exemple une courbe de 1° sur 50 m.

L'emploi des pompes immergées permet une plus grande tolérance mais généralement il ne convient pas de dépasser une déviation de 1° sur moins de 30 m.

En cas de terrains dont le pendage est très redressé ou comportant l'alternance de bancs durs et tendres, une déviation risque de se produire. Pour la réduire, il faut utiliser un matériel spécial.

La construction de forages dirigés, volontairement déviés, est pratiquée pour certains travaux (géothermiques notamment) mais elle ne se justifie pas en forages d'eau.

Fluide de circulation

Le forage par rotation exige un fluide de circulation dont les caractéristiques doivent être adaptées à la nature des terrains traversés, aux venues ou pertes susceptibles de se produire, à la nécessité d'améliorer la tenue des parois.

Avant toute exécution, l'entrepreneur devra préciser la technique qu'il emploiera ainsi que le fluide de circulation prévu aux différentes phases du programme de forage.

La boue de forage est habituellement obtenue en mélangeant à l'eau une argile spéciale, la bentonite.

Un foreur sérieux en établit les caractéristiques, viscosité et densité, aux valeurs qui conviennent le mieux à la remontée des déblais de forage, au refroidissement et à la lubrification des outils, à la bonne tenue des parois, à la protection du milieu aquifère.

Il ajoutera du tanin pour réduire la viscosité, de la barytine pour accroître la densité, etc..

La composition du fluide peut être ainsi modifiée à volonté à l'aide de différents additifs (huiles, chaux, amidon, chlorures de sodium et autres), en quantités variables, pour faciliter certains passages difficiles (en terrains argileux, gypseux, salés, etc..).

La responsabilité en incombe au foreur. Des prescriptions mal venues pourraient contrarier l'avancement du chantier.

Le fluide de circulation forme un dépôt par filtration sur les parois poreuses du forage. Ce dépôt, le cake, se trouve consolidé par la pression. Il doit être éliminé avant de cimenter (grattages de paroi avec des outils spéciaux) et encore plus impérativement avant la pose des crépines, au droit du terrain aquifère à exploiter (fracturation par pistonnage, lavages répétés à l'eau claire, etc..).

Les mousses et les boues aérées réduisent la croûte formée et peuvent être employées si la tenue des parois permet d'attendre la pose du tubage.

Les fluides non colmatants, air et eau claire, ne peuvent être utilisés que dans des circonstances relativement exceptionnelles, de bonne tenue des terrains, mais il existe des fluides biodégradables qui perdent leur viscosité en quelques jours.

Leur utilisation constitue un progrès dans les limites de leur emploi (température inférieure à 60° - pH de valeur adéquate - mode de décantation adapté - durée avant dégradation suffisante pour donner le temps d'exécuter les travaux). Elle devrait devenir courante en forages d'eau.

Prélèvement d'échantillons

Selon le mode de foration employé, il est plus ou moins facile de procéder à l'examen des éléments d'extraction et de les analyser.

Le prélèvement relève de deux techniques :

- soit prise directe d'échantillons provenant des cuttings, débris de forage,
- soit recours à un outil destiné à cet usage, le carottier.

Les échantillons seront prélevés à la demande du directeur de travaux.

Le carottage est une opération coûteuse en raison du temps d'exécution que nécessite sa mise en oeuvre. Les examens effectués sur les cuttings sont de règle et les prises d'échantillons au carottier sont limitées aux emplacements judicieusement choisis, notamment pour le calage des diagraphies.

La prise d'une carotte peut être imposée par la nécessité de reconnaître la cause de pertes de boue. C'est une manoeuvre délicate à effectuer par le foreur à un moment où il maîtrise mal l'injection du fluide.

L'examen des carottes permet d'apprécier la granulométrie, la cimentation des grains, la porosité, la fissuration.

Les quantités prélevées doivent être suffisantes pour exécuter les essais en laboratoire. Pour cela, le diamètre de l'échantillon ne peut être inférieur à 50 mm.

Une fiche technique est établie à chaque prélèvement effectué. Aux termes du contrat passé avec l'entreprise, le règlement des prises d'échantillon doit être bien défini, séparant le mètre de forage carotté et les manoeuvres de matériel.

Equipement du forage

Tubage

La qualité du tubage est essentielle à la durée de l'ouvrage.

Le débit d'exploitation et la profondeur définissent les dimensions de la foration et permettent de choisir le plan de montage des colonnes.

Le choix de la pompe correspondant au débit à extraire fixera le diamètre du tubage (il pourra varier de 5" à 16" et plus).

Un jeu est à maintenir :

- entre l'intérieur du tube et la pompe (de l'ordre du 1/2" sur le pourtour),
- entre le forage et le tubage, notamment s'il y a lieu de réserver un vide de cimentation (d'au moins 1" sur le pourtour). Pour tenir compte de la surépaisseur des manchons, on augmentera d'autant le diamètre du trou à prévoir.

Pour chaque colonne à placer, les tubes devront répondre aux calculs de résistance du projet, en fonction de caractéristiques géométriques (épaisseur, donc diamètre extérieur et poids) et mécaniques, résistances à la traction et à l'écrasement, (déterminant les qualités d'acier à retenir).

Les choix porteront sur des dimensions courantes, faciles à approvisionner.

Les forages d'eau sont équipés couramment de tubes en tôles noires, roulées et soudées, assemblés par manchons soudés, parfois bitumés. Ces tubes sont soudés directement entre eux ou raccordés par manchons soudés.

Ces modes de fabrication et d'assemblage, les moins coûteux, sont cependant à déconseiller en raison des inconvénients résultant de mauvais assemblages ou de soudures défailtantes, difficultés de guidage à la pose, ainsi que d'une moindre résistance à la corrosion.

Il est préférable d'éviter les soudures et d'utiliser la technique des tubes étirés à chaud et filetés dans la masse, assemblés par manchons filetés.

TRAVAUX DE FORAGES D'EAU

Deux exemples de profils de forage et de plans de tubage utilisant des dimensions usuelles (outils "rotary" et tubages).

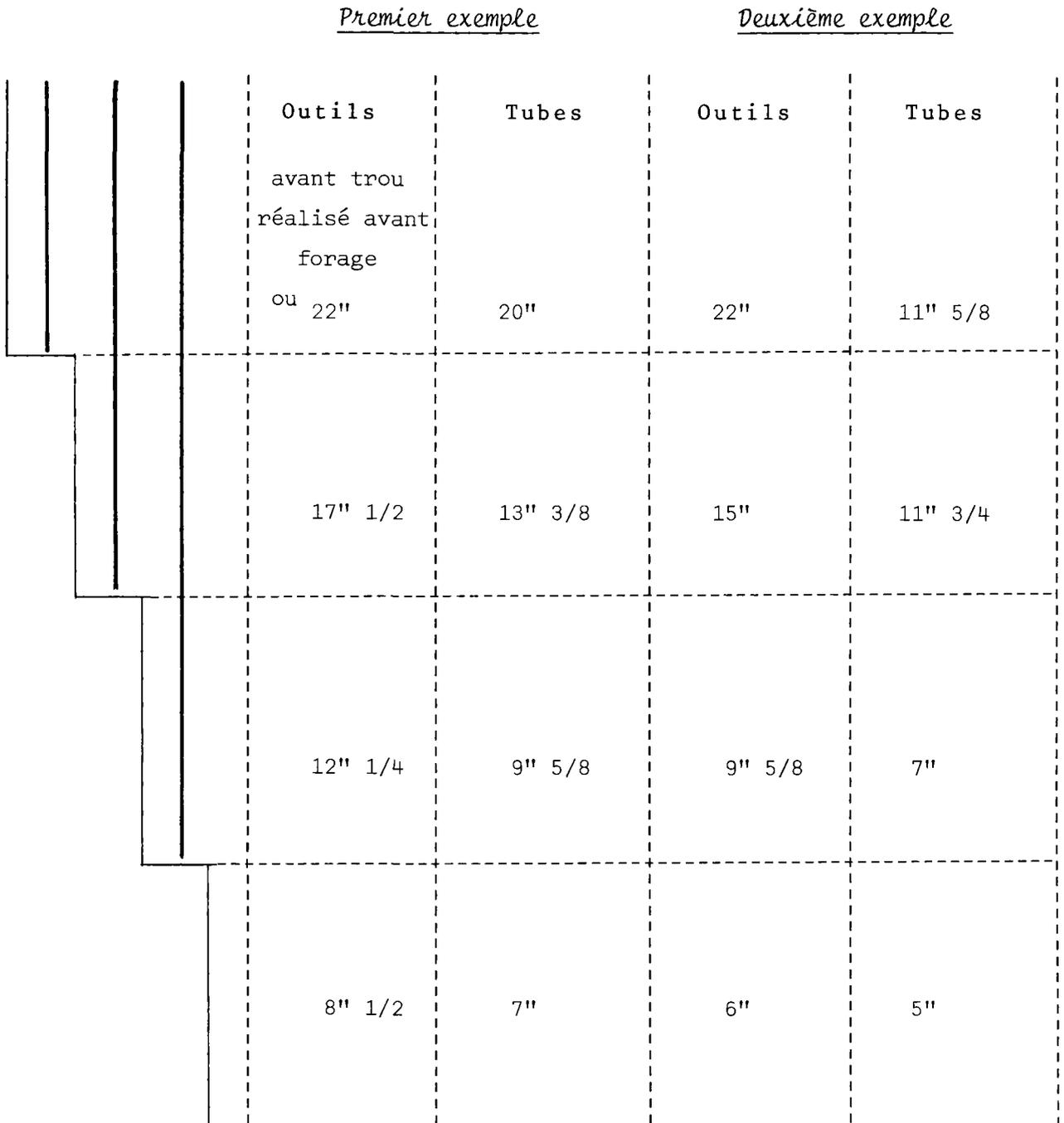


Figure 1

Les tubes en acier étiré sans soudure, assemblés par manchons filetés, sont commercialisés par longueurs variant de 4 à 10 m.

L'utilisation de grandes longueurs est plus économique mais nécessite des matériels de transport, de manutention et de pose adaptés.

Ces tubes étant filetés extérieurement, leur protection est à assurer pour conserver le filetage en bon état. Leur mise en place utilise des produits de bloquage et d'étanchéité des filetages.

Le tubage représente une part importante de la dépense de construction d'un forage d'eau. Une augmentation de son épaisseur accroît l'investissement mais améliore considérablement la sécurité de pose et la durée d'utilisation.

Le choix du tubage résultera des caractéristiques du matériel proposé (fatigue à la pression et à la traction, résistance à l'écrasement dont l'insuffisance est la cause de détérioration de forages d'eau). Le commerce propose toutes les qualités d'aciers ainsi que de matériaux spéciaux et, pour un même diamètre, les tubes peuvent être livrés en différentes épaisseurs.

Les tubes, crépines et raccords utilisés en forage d'eau ne sont pas normalisés : la résistance à l'écrasement est rarement indiquée et une gamme trop grande de produits provoque des pertes résultant du mauvais emploi des stocks.

Le choix doit en être fait avec discernement. Le directeur des travaux vérifiera les caractéristiques de l'équipement proposé, notamment en ce qui concerne la pression d'écrasement, donc l'épaisseur de tubage à adopter.

Pour diminuer l'effort de traction sur le tube de tête pendant le montage, on utilise la technique qui consiste à faire flotter la colonne au cours de la pose par obturation du fond.

Des tubes répondant aux normes API (de l'American Petroleum Institut) sont fabriqués et commercialisés en France. Ils apportent toutes garanties dans les conditions d'emploi indiquées par le constructeur.

Les tubes en chlorure de polyvinyle (P.V.C.) et en fibres de verre deviennent d'un emploi courant mais des précautions sont à prendre pour ne pas dépasser leurs seuils de résistance.

Afin d'éviter l'attente de tubes supplémentaires, il est d'usage d'augmenter de 15 % les longueurs à prévoir. Il en résulte des frais de reprises et d'immobilisation qui pourraient être en grande partie évités par de meilleures études préalables.

Pour des travaux à grande profondeur, le maître d'ouvrage peut envisager que les tubages soient directement approvisionnés par ses soins. Il devra alors tenir compte de toutes les pièces spéciales nécessaires ainsi que de la longueur unitaire des tubes correspondant à la capacité de la machine de forage qui sera employée sur le chantier.

Crépines

Ce sont des tubes perforés placés à la suite du tubage plein pour capter l'eau dans son site tout en maintenant en place le terrain aquifère, directement ou par l'intermédiaire d'un massif filtrant.

Leur emploi ne s'impose pas en terrains durs, fracturés ou fissurés mais de bonne tenue.

La forme et la dimension de leurs ouvertures doivent être choisies en fonction de la granulométrie du terrain aquifère et de la qualité chimique des eaux dans le but de faciliter le développement et d'éviter le colmatage.

Les crépines sont des pièces de précision. Elles ne doivent comporter ni bavures ni irrégularités qui risquent de déclencher ou accélérer les processus de corrosion et d'incrustation.

Une confection sur le chantier n'ayant pas les qualités requises est à éviter.

Les crépines doivent avoir une résistance à l'écrasement qui empêche leur détérioration tant à la mise en place qu'en cours d'utilisation. Elles seront soumises aux mêmes modes de calcul que les tubages.

Leur conception et leurs caractéristiques peuvent être précisées à l'étude du projet, notamment en ce qui concerne le rapport de la surface des ouvertures à la surface totale de la colonne captante. Dans tous les cas, ces indications doivent figurer au contrat passé avec l'entreprise.

Différents matériaux peuvent être employés (acier, inox, cuivre rouge, bronze siliceux, bois bakéliné, fibres de verre, matières plastiques).

Le choix portera sur un matériau adapté à la composition chimique des terrains traversés et de l'eau captée.

Le fournisseur devra préciser le type de perforation proposé et le mode d'exécution.

Les normes de résistance seront indiquées par le constructeur.

Un choix judicieux retiendra :

- une matière inerte (synthétique) ou un acier spécial en cas de risques de corrosion,
- des fentes transversales,
- des nervures longitudinales,

Le débit obtenu est en rapport avec la longueur crépinée, mais sans être proportionnelle à elle.

Les crépines seront à placer au droit des horizons de bonne perméabilité dont les auscultations par diagraphies auront permis de déceler l'emplacement.

Le mode de pose de la crépine (conditions d'obturation de l'annulaire supérieur notamment) doit être agréé par le directeur des travaux.

Pour retenir un sable très fin, il est possible d'utiliser une crépine double constituée par deux crépines emboîtées, l'espace annulaire étant rempli d'un gravier filtre.

Le captage par un même ouvrage de deux aquifères superposés, séparés par un imperméable, est à déconseiller si les pressions sont différentes sur les deux aquifères. En dehors des périodes de pompage, l'invasion d'un aquifère par l'autre serait difficile à éviter. Si les pressions sont à l'équilibre, l'exploitation peut en être faite simultanément, même si la lithologie est différente.

Les parties crépinées sont alors adaptées aux caractéristiques de chaque aquifère traversé et reliées entre elles par un tube plein. La réalisation d'un ensemble de même diamètre facilite la mise en place.

MISE EN PRODUCTION DES OUVRAGES

Lorsque le terrain aquifère présente des éléments fins, mobiles et facilement colmatants, l'obtention d'une bonne productivité et son maintien dépendent des opérations ci-après.

Développement

Au pompage, des grains de sable sont mis en suspension.

En agissant sur le pourtour de la crépine, le développement consiste à retirer les éléments fins qui risqueraient d'être entraînés en cours d'exploitation, causant l'usure des pompes, et à améliorer la granulométrie pour augmenter le débit capté.

La technique du développement, bien que présentant un très grand intérêt, est peu ou assez mal pratiquée.

Il ne suffit pas qu'un équipement soit adapté aux travaux prévus. Il faut que le forage puisse atteindre sa performance de débit.

Le terme de développement recouvre des procédés variés qu'il convient de soumettre aux choix du géologue. Leur mise en oeuvre est délicate. Elle nécessite une grande maîtrise d'exécution de la part de l'entreprise.

Le développement peut être entrepris sur l'ensemble de la partie crépinée ou par longueurs successives isolées par des packers. Pour effectuer cette opération, l'entrepreneur doit éviter les rejets trop chargés qui risquent de colmater les réceptacles, égouts ou fossés.

La conduite du développement dépend du débit d'exploitation recherché.

Toute modification dans le régime de pompage oblige à reprendre le développement, caractérisé en fin d'exécution par une absence totale de dépôts après un pompage à l'eau claire en continu à un débit donné.

Les tolérances seront éventuellement précisées en indiquant la valeur admissible de la turbidité au maximum de débit.

Un test de chantier très simple consiste à remplir d'eau pompée un flacon sphérique de l'ordre de 500 cc et à examiner le dépôt formé dont le diamètre ne doit pas dépasser une valeur donnée, 10 mm par exemple.

On peut employer également un cône transparent renversé (élutriomètre) permettant de quantifier de très faibles dépôts.

Les phases successives du développement font intervenir diverses techniques.

Par exhaure

- o par pompage à débit progressif, augmentant par exemple de 10 % par 24 h jusqu'à dépasser d'au moins 50 % le débit d'exploitation demandé ou à débit

variable mais en évitant l'utilisation d'une pompe trop puissante fonctionnant par intermittence, ce qui modifierait trop brutalement la granulométrie du terrain.

- o par agitation, à la soupape ou à l'air comprimé, effectuée à l'intérieur du forage à différents niveaux.

Par traitement chimique

Ce moyen est utilisé pour les terrains aquifères renfermant des éléments que le produit employé permet d'éliminer en les solubilisant :

- . à l'acide, injecté par gravité ou mieux sous pression en y adjoignant un inhibiteur de corrosion pour protéger les tiges et les tubes, et parfois des agents mouillants pour faciliter l'attaque. La pénétration dans le terrain est améliorée par une succession d'injections à l'acide et à l'eau sous pression.

L'acide chlorhydrique permet d'agrandir les passages d'eau en terrain calcaire. Son action est très rapide. Elle peut être répétée en fonction des améliorations constatées.

Pompage et injections alternés permettent d'éliminer les impuretés formées d'oxydes de fer ou d'alumine dont les précipités risqueraient de colmater les fissures. Ces impuretés sont maintenues en dissolution en amenant le pH à de faibles valeurs par adjonction d'acide citrique ou lactique (10 gr par litre).

La première injection est faite en volume correspondant à celui du forage : les passages sont augmentés en volume pour tenir compte de l'effet de dissolution auquel est soumis le terrain.

L'acidification a une action rapide et il est inutile de laisser la solution en place ; il est préférable d'effectuer un pompage de nettoyage et de renouveler l'opération. Les produits sortants ont à présenter un état acidifiant résiduel aussi faible que possible.

Cependant, des précautions doivent être prises en cas de rejet des produits de nettoyage dans un cours d'eau afin d'éviter des dommages à la faune piscicole. Elles consistent à réduire les teneurs en chlorures par un étalement des temps de pompage ou à injecter une solution de soude dans la conduite d'exhaure pour régler le pH sur celui de la rivière.

- . aux polyphosphates

Agissant sur les échanges sodium-calcium, ils provoquent la défloculation des argiles, ensuite éliminées par pompage. Ils ne sont à employer que dans des terrains peu colmatés par des éléments argileux. Ils donnent de très mauvais résultats dans les terrains nettement argileux.

Leur mise en oeuvre s'effectue par des pistonages successifs pour obtenir un effet mécanique qui déstabilise le dépôt argileux.

Différents produits provenant de sels de soude (pyrophosphates tétrasodiques - hexamétophosphates de sodium, etc..) peuvent être utilisés. Leur limite d'emploi est fixée par la température qui doit rester inférieure à 60-70° C. Leur action varie avec le pH.

Les échantillons du terrain aquifère seront analysés pour consulter les fournisseurs et fixer un choix.

A doses faibles, les solutions de polyphosphates permettent de dissoudre le dépôt formé sur la paroi du forage par le fluide de circulation.

Les techniques de développement peuvent faire succéder de courts pompages de débit supérieur au débit d'exploitation (de 20 à 30 %), des circulations d'air comprimé et des injections intermittentes de polyphosphates afin de défloculer les argiles.

En cas d'acidification des précautions sont à prendre. Les polyphosphates placés dans un milieu acide tendraient à effectuer une réversion en orthophosphates agissant comme un floculant pour les argiles.

Par fracturation

Le développement à l'explosif n'est guère employé pour accroître la fissuration des terrains rocheux. Considéré comme l'intervention de la dernière chance, il consiste à faire exploser une charge importante (de 50 à 250 kg de nitroglycérine ou de dynamite gomme) dans un ouvrage que toute autre opération n'a pu rendre productif.

On lui préfère la fracturation hydraulique à très haute pression en l'associant éventuellement à l'acidification. L'exécution en est confiée à des entreprises spécialisées.

Filtres (massifs filtrants)

Lorsque le forage pénètre un aquifère constitué par le mélange d'éléments grossiers et de grains fins et si les ouvertures de la crépine ont été choisies de telle sorte qu'elles laissent passer les éléments fins, le développement provoque un déplacement des éléments grossiers qui viennent se grouper à proximité des parois de la crépine alors que les particules fines sont éliminées. Cette action permet de constituer un filtre naturel.

Pour améliorer le développement de terrains aquifères dont la granulométrie est uniforme et fine, un anneau de gravier est mis en place à l'extérieur de la crépine afin de remplir l'espace annulaire qui l'entoure et constituer un filtre artificiel.

Le gravier, silicieux si possible, doit être propre, sans argile ni sable, à grains arrondis, de calibre adapté à la granulométrie du terrain aquifère. Un échantillon de ce terrain sera prélevé et analysé pour fixer le choix du gravier conditionnant la dimension qu'il convient de donner aux ouvertures de la crépine.

Ces graviers, rares, donc chers, peuvent être avantageusement remplacés par un matériau roulé, de rivière ou de terrasses anciennes.

Une forme sphérique limite les pertes de charge. Le caillou roulé et lavé est classé par un calibre de dimension supérieure à celle des fentes de la crépine.

L'épaisseur du filtre doit être de 2 à 3 fois le diamètre du plus gros grain qui le constitue.

L'établissement du filtre complète le développement qui enlève les parties fines jusqu'à la stabilisation des gravillons injectés.

Il importe de contrôler la bonne répartition du massif filtrant autour de la colonne de captage et d'éviter la formation de vides entre la crépine et le terrain aquifère.

Les filtres sont parfois préfabriqués autour de la crépine (filtres agglomérés).

Le filtre ne doit pas être confondu avec un massif de gravier remplissant l'espace annulaire entre le forage et le tubage, et qui constitue un élément de soutènement.

POMPAGES D'ESSAI

Les tests effectués comportent deux objectifs :

- d'une part, l'évaluation des paramètres hydrodynamiques, ce qui est important pour la gestion de la ressource,
- d'autre part, la détermination du débit de pompage que l'ouvrage pourra supporter et dont dépend le choix de l'équipement.

Ces pompages permettent de vérifier la qualité des travaux effectués.

Aux différentes phases de la réalisation, ils indiqueront la productivité de l'ouvrage, les mesures étant effectuées après chaque opération, et permettront de vérifier les améliorations obtenues par les travaux de développement, les acidifications, etc..

Le forage terminé, ils précéderont l'équipement en matériel d'exploitation.

L'entreprise est tenue :

- de fournir des appareils de mesure étalonnés (bacs à déversoirs, compteurs etc..),
- d'effectuer les essais (débit, durée, hauteur de refoulement).

Le matériel approvisionné doit être largement conditionné pour obtenir le débit maximal en régime régulier, sans interruption, pendant toute la durée de pompage majorée de 24 h.

La hauteur de refoulement doit correspondre à la différence verticale entre le niveau dynamique le plus bas attendu et le niveau du sol au voisinage du forage, sauf contre-indication particulière fixant une pression de refoulement.

Les eaux pompées seront évacuées à une distance telle que leur retour à l'ouvrage ne puisse se produire directement ou par l'intermédiaire de l'aquifère, au cours des essais.

Le maître d'ouvrage doit fixer le point de rejet retenu et s'assurer de la possibilité d'évacuer les eaux sans causer de dommages aux tiers. Dans tous les cas, il est responsable de leur réparation.

L'entrepreneur est tenu de fournir les tuyaux et flexibles de refoulement permettant d'évacuer le débit maximal au cours des essais.

Le débit et la durée des essais doivent être fixés par l'hydrogéologue.

La durée est déterminée en fonction :

- de l'exploitation envisagée (pompage continu ou discontinu),
- des conditions d'alimentation de la nappe si elles risquent d'influencer les indications recueillies,
- de la stabilisation relative du niveau dynamique.

Une durée de 72 h, couramment citée, n'est qu'indicative. Elle doit être précisée par les spécifications techniques.

L'essai de pompage n'est valable que s'il débute après que la nappe ait repris son état d'équilibre (variations inférieures à 10 cm en 24 heures).

L'entrepreneur doit garantir la stabilité absolue du débit au cours des essais.

En cours de pompage et après l'arrêt, l'entrepreneur relève, sur une fiche normalisée, les observations faites : temps, débits, niveaux, températures, prise d'échantillons pour analyses.

L'installation de limnigraphes sur les piézomètres permet d'enregistrer les fluctuations de la nappe.

Si l'ouvrage définitif est implanté à proximité même d'un sondage de reconnaissance, celui-ci peut être utilisé comme piézomètre pour renseigner sur la perte de charge causée par l'ouvrage.

PROTECTION DE LA RESSOURCE

Cimentation en tête

Lors de l'exploitation d'une ressource en eau souterraine, la protection naturelle de l'aquifère doit être maintenue et si possible améliorée.

Les risques de pollution extérieure doivent être éliminés le mieux possible.

L'entrepreneur devra prendre sur le chantier toutes les précautions destinées à empêcher les rentrées d'eau superficielle dans l'ouvrage ou de déchets, carburants, corps gras ou autres, directement ou par infiltration à travers le sol.

Une attention particulière doit être portée à la propreté des lieux et à l'imperméabilisation des bacs à boues.

Au départ, le forage est alésé à un diamètre supérieur de 5 à 8 cm à celui du tubage afin de pouvoir couler une colonne de cimentation, bien injectée, sur une hauteur de 10 m.

Cimentation du corps de l'ouvrage

L'ouvrage doit être étanche aux formations aquifères indésirables.

La mise en communication de niveaux aquifères différents présente de multiples dangers :

- transferts non contrôlés,
- variations de la pression pouvant modifier l'artésianisme ou les niveaux de pompage,
- minéralisations accidentelles, etc..

L'espace annulaire tube-terrain ou tube-tube est rendu étanche par une cimentation totale utilisant un ciment très liquide injecté sous pression et réalisée suivant les indications données par le géologue (départ de la cimentation, sa hauteur, l'épaisseur de l'anneau de ciment qu'il est nécessaire d'établir pour assurer l'étanchéité).

Le coulis de ciment est mis en place :

- . soit par injection, à l'intérieur du tubage, et refoulement par la base de l'annulaire. Il doit refluer au niveau du sol si le tubage à cimenter atteint la surface ;
- . soit par gravité, directement dans l'espace annulaire. Cette méthode est à employer obligatoirement s'il s'agit de cimenter :
 - une hauteur complète de tubage au-dessus d'un filtre ou d'un massif de soutènement,
 - un tronçon de tubage ou des portions successives (cimentations multiples - étagées) pour éviter que la pression résultant de la colonne de ciment avant sa prise soit trop importante.

La vitesse de prise doit être rapide et apporter un faible retrait. La durée d'attente est d'au moins 48 h pour la cimentation des tubages profonds.

L'entrepreneur doit préciser, au titre des engagements contractuels, le mode d'exécution qu'il utilisera, notamment en ce qui concerne la composition du coulis de ciment et les conditions de sa mise en place.

Les entreprises utilisent des matériels de chantier qui permettent d'effectuer les cimentations courantes. Dès que la hauteur à rendre étanche est importante, la préparation du coulis de ciment et son injection rapide à la pression voulue exigent d'utiliser un matériel adapté et même de recourir à une société de services spécialisée, qualifiée pour effectuer des interventions délicates et apportant la garantie des moyens mis en oeuvre.

Les contrôles de cimentation doivent être précisés aux spécifications techniques du projet, qu'il s'agisse de contrôler la continuité de la gaine ou son adhérence en utilisant des méthodes acoustiques ou thermométriques.

La reprise de cimentations irrégulières est très coûteuse. Une première cimentation mal conduite peut entraîner des frais complémentaires qui doublent le coût des travaux.

La cimentation est une opération importante pour le forage. Outre l'isolation de nappes, elle permet d'effectuer le scellement du tubage en l'isolant des terrains et en constituant ainsi une protection extérieure qui joue un grand rôle pour la vie de l'ouvrage.

Sa réalisation est délicate. Elle demande une surveillance particulière.

ANALYSES D'EAU

Les prélèvements sont difficiles à effectuer tant que l'ouvrage n'est pas tubé.

Il est utile cependant de remonter des échantillons en usant éventuellement de moyens de pompage pneumatique.

L'entreprise doit prévoir le matériel nécessaire. Il est indispensable, en effet, de disposer des informations qui détermineront la mise en production (tubages-crépines) et la protection (cimentations) s'il y a lieu.

Seront recherchées :

- la valeur du pH,
- l'alcalinité totale,
- la dureté totale,
- les teneurs en chlorures, fer, manganèse, sulfates,
- la conductivité,
- la teneur totale en sels dissous.

L'exécution de sondages de reconnaissance permet d'acquérir ces informations. Sur le chantier, un outillage portatif de laboratoire peut être utilisé pour déterminer :

- le TAC (titre alcalimétrique complet),
- le pHS (pH de saturation),

et en déduire l'indice de stabilité de RYZNAR.

Les analyses de chantier font connaître les tendances de l'eau et conduisent aux études complémentaires s'avérant indispensables.

D'après le classement de LANGELIER :

- pH < pHS tendance agressive
- pH > pHS tendance incrustante

D'après l'indice de stabilité de RYZNAR :

- 4 à 5 eau très incrustante
- 5 à 6 eau légèrement incrustante
- 6 à 7 eau à peine incrustante ou à peine corrosive
- 7 à 7,5 eau très corrosive
- 7,5 à 9 eau fortement corrosive
- plus de 9 eau très fortement corrosive.

Le choix du matériau à employer pour les tubes et crépines est indiqué dans le tableau ci-après.

Matériau préconisé	Valeur de l'indice de stabilité de RYZNAR
Matière plastique	entre 7,5 et 18
Acier à faible teneur en carbone	entre 7 et 8
Fer ARMCO	entre 6,5 et 8
Cuivre rouge silicieux	entre 6 et 8,5
Everdur (bronze)	moins de 9

Super Nickel	moins de 9
Monel "400"	moins de 9,5
Acier inox "304"	moins de 12
Acier inox "340" ELC (très faible teneur en carbone)	moins de 15
Acier inox "316"	moins de 16
Acier inox "316" ELC	moins de 18

Sur le chantier, les examens bactériologiques peuvent utiliser les techniques simplifiées de l'A.P.H.A. (American Public Health Association).

Les tubes Hach stérilisés, emballés, prêts à l'emploi, sont utilisés pour mettre en évidence les bactéries coliformes qui accompagnent généralement les germes pathogènes. Cette méthode est rapide et peu coûteuse.

DURABILITE DES OUVRAGES

Au cours de son exploitation, un forage d'eau sera exposé aux phénomènes de corrosion et d'incrustations qui portent atteinte à l'intégrité de l'ouvrage dans ses parties vives. Il est indispensable de réduire ces risques. Les méthodes préventives sont trop souvent insuffisantes alors que des dommages irréversibles peuvent être causés dans un laps de temps relativement court variant de quelques mois à quelques années.

Les dénoyages occasionnés par des débits de pompage qui dépassent la productivité de l'ouvrage sont une cause de colmatage et de corrosion en raison de la formation d'oxydes de fer de dépôts calcaires.

Corrosion

Elle altère la matière mise au contact du terrain et de l'eau, les métaux durs étant plus rapidement corrodés que les matériaux tendres ou recuits.

Les causes en sont :

- soit d'origine chimique, du fait de l'acidité de l'eau ou des terrains traversés (action de bioxyde de carbone, d'oxygène dissous, d'hydrogène sulfuré, de chlorure ou de sulfates, etc..),
- soit d'origine électrochimique en raison de phénomènes d'électrolyse provoqués par les métaux de composition différente reliés par un milieu conducteur (eau salée), par le contact de terrains de compositions différentes, par des courants vagabonds résultant de la proximité de transformateurs, d'installations urbaines et industrielles, de courants induits ayant pour origine les moteurs électriques des pompes immergées, etc..

Dans tous les cas, la dissolution du métal a des incidences graves sur la pérennité des ouvrages :

- détérioration des tubages et des crépines dont la résistance mécanique se trouve diminuée, ce qui entraîne leur écrasement et leur rupture ;
- élargissement des ouvertures des crépines provoquant de brèves augmentations de débit suivies de venues de sable.

Les remèdes consistent, lorsque les causes en sont :

- chimiques, en un choix du matériau constitutif de la crépine (cuivre rouge, aciers inoxydables, bronze, chlorure de polyvinyle) qui résiste à la destruction ;
- électrochimiques, en isolation ou revêtements, caoutchoucs, plastiques ou en protection cathodique du métal.

Une cimentation peut être à recommander lors de la traversée de nappes salées, de terrains salés, d'argiles corrosives, de gypse, etc..

Il convient de retenir que :

- le contact de métaux de caractéristiques différentes est un facteur de corrosion (effet de pile) à éviter en intercalant des joints électriquement non conducteurs ; *il est en tout cas préférable d'utiliser un matériau unique pour réaliser l'équipement* ;
- la protection cathodique permet de prévenir les attaques dues aux courants vagabonds et il est recommandé d'isoler la pompe et la colonne de refoulement par des mises à la terre distinctes ;
- les revêtements plastiques parfois utilisés pour protéger les crépines sont efficaces mais il faut veiller à ce qu'ils ne risquent pas d'être endommagés en cours de transport ou de pose ;
- une épaisseur renforcée des matériaux accroît sensiblement la vie des ouvrages ;
- l'emploi des inhibiteurs de corrosion renforce la résistance des tubages.

Le recours aux techniques d'auscultation des forages en service (dont les caméras de télévision) et les procédés de réfection par chemisage justifient l'intérêt d'une assistance technique après mise en exploitation, pour les ouvrages qui présentent d'importants risques de corrosion.

Incrustations

Elles résultent de :

- la transformation de sels solubles (carbonates de chaux et de magnésie, composés ferreux, ferriques ou manganéux) en sels insolubles qui se déposent sur la paroi filtrante de la crépine,
- la formation de dépôts, limons ou argiles,
- l'action de bactéries qui pourront être incrustantes mais aussi corrosives, ou d'autres organismes vivants.

Des changements de pression dus au pompage ou des modifications de température peuvent déclencher les processus.

Outre les analyses qui précisent la composition de l'eau ainsi que l'importance et la nature des matières en suspension, la connaissance des aquifères renseigne par expérience sur les risques encourus.

Pour limiter les incrustations, il convient :

- d'augmenter les sections de passage dans les crépines pour obtenir des vitesses de l'ordre du centimètre-seconde,
- d'éviter les rentrées d'air qui occasionnent les précipités, ce qui est obtenu en réduisant le rabattement dans le forage et en évitant de dénoyer les crépines,
- de prévoir des traitements périodiques à l'acide, pour éliminer les premiers dépôts et retrouver le débit initial.

Les remèdes consistent :

- à mettre en oeuvre un développement efficace,
- à employer un matériau constitutif de la crépine qui résiste aux traitements d'entretien et à leur pression d'injection.

Pour retenir in situ les composés ferreux, ferriques ou manganéux qui, outre les dommages causés aux forages, provoquent des détériorations dans les réseaux de distribution, il peut être proposé d'appliquer au terrain aquifère entourant le forage un traitement qui consiste en injections d'air enrichi d'oxygène, ce qui active les phénomènes d'oxydation par les bactéries en vue d'une rétention des composés du fer et du manganèse ainsi éliminés des eaux pompées.

Cette intervention est répétitive ; son efficacité comporte des incertitudes quant à la nature et au volume des précipités formés provoquant le colmatage du terrain aquifère.

PROGRAMMES D'AUSCULTATION

Les sondages de reconnaissance et les forages d'eau sont des travaux généralement coûteux. Il convient de recueillir de leur exécution le plus grand nombre d'observations utiles.

D'importants progrès demandent à être réalisés dans ce domaine.

Les techniques d'auscultation ne sont pas assez utilisées, leur intérêt étant trop souvent sous-estimé.

Les consultations par diagraphies consistent à enregistrer dans le forage une grandeur physique déterminée en fonction de la profondeur. Elles offrent le moyen de connaître les caractéristiques des terrains traversés.

En outre, elles permettent d'établir un état initial qui sera utile lors des contrôles ultérieurs d'entretien.

Les mesures à effectuer à l'intérieur des ouvrages forés sont :

La résistivité

Mesurée dans les forages non tubés, remplis d'eau ou de boue, la résistivité varie en fonction des changements intervenant dans la nature des terrains, de leur teneur en eau, du degré de minéralisation de l'eau qu'ils contiennent.

Ces variations sont reportées en correspondance des profondeurs sous forme d'une courbe obtenue manuellement, par enregistrement automatique ou encore par bande magnétique en vue d'une exploitation par un ordinateur électronique.

La coupe géologique est précisée, la position et l'épaisseur de l'aquifère déterminées, la qualité de l'eau appréciée par les valeurs de la résistivité de la formation.

Les différences de potentiel ou polarisation spontanée

Réalisables généralement en même temps que les diagraphies de résistivité, elles constituent ensemble un "log électrique".

Les potentiels spontanés sont d'origine électrocinétique (effet de membrane entre la boue du forage et l'eau des formations), ou électrochimique (différence des concentrations des solutions représentées par les boues, l'eau des formations et l'eau des argiles).

La courbe de polarisation spontanée (P.S.) est obtenue en mesurant les variations de potentiel entre un point mobile à l'intérieur du forage et un point fixe en surface.

La méthode consiste à utiliser un voltmètre très sensible (au millivolt) branché entre la prise de terre et l'électrode mobile. Aucune source auxiliaire de courant n'intervient.

L'enregistrement est effectué soit par points, soit de façon continue.

La polarisation spontanée ne donne que des éléments d'appréciation sur la perméabilité des terrains et les limites de couches imperméables; ils peuvent être fort utiles mais il ne faut pas ignorer le phénomène de dérive qui entache d'erreurs les indications relevées dans certains forages de faible profondeur sans que ce phénomène puisse être bien expliqué.

Les rayons gamma

Cette diagraphie, dénommée gamma-ray, consiste, aussi bien dans les forages tubés et cimentés qu'en trou libre, remplis ou non de boue de circulation ou d'eau, à enregistrer par points ou de manière continue sur toute la hauteur du forage la radio-activité naturelle des terrains traversés.

Sous réserve des incertitudes résultant des fréquences d'émission des minéraux radioactifs rencontrés et de la précision du matériel de détection, elle permet de localiser les formations argileuses généralement radioactives et les séries sableuses, gréseuses ou calcaires à faible radioactivité.

La vitesse de circulation de l'eau

Cette diagraphie peut être faite dans un sondage au repos si l'eau s'écoule naturellement ou au cours d'un pompage.

La composante verticale de la vitesse de l'eau est mesurée à l'aide d'une hélice mise en rotation par le déplacement de l'eau et reliée à un compte-tours.

L'appareil est un micromoulinet.

Cette méthode permet de repérer exactement les zones productives et d'adapter la mise en place des crépines à leur positionnement.

Récapitulation

D'autres procédés d'auscultation peuvent être utilisés dans les forages d'eau :

- thermométrie (sonde thermique),
- radioactivité provoquée (sonde à neutrons).

Le tableau ci-après résume les procédés d'auscultation applicables aux forages d'eau :

Résistivité	Paramétrie mesurée	Applications	Caractéristiques du forage
<p>Mesure de différence de potentiel créé par un courant continu injecté dans les formations</p> <p>La profondeur d'investigation augmente avec la taille du dispositif :</p> <p>Petite Normale : PN</p> <p>Grande Normale : GN</p> <p>Latérale : LAT</p>	Résistivité apparente (en ohm m)	<ul style="list-style-type: none"> - Délimitation des couches - Corrélation entre forages - Détermination approximative de la résistivité vraie des formations, d'où une détermination possible de la porosité, connaissant la résistivité des eaux de formation par la P.S. 	ouvert, en eau

Polarisation spontanée (P.S.)

Mesure de différences de potentiel	Potentiel électro-physique (en mV)	<ul style="list-style-type: none"> - Délimitation des couches - Corrélation entre forages - Détermination approximative de la résistivité des eaux de formation connaissant la résistivité de l'eau du trou 	ouvert, en eau
------------------------------------	------------------------------------	--	----------------

Rayons gamma (gamma-ray)

Détection des rayons gamma naturels issus des éléments radioactifs contenus dans les formations	Radioactivité naturelle	<ul style="list-style-type: none"> - Détermination des zones argileuses par le potassium radioactif qu'elles contiennent - Corrélation entre forages 	ouvert ou tubé, sec ou en eau
---	-------------------------	--	-------------------------------

Vitesse de circulation de l'eau (micromoulinet)

Détermination de la vitesse verticale de l'eau à l'aide d'une hélice et d'un compte tours	Vitesse verticale de l'eau (en cm/s)	- Détermination des niveaux productifs, des zones de perte des débits	ouvert ou tubé, en eau
---	--------------------------------------	---	------------------------

Thermométrie (sonde thermique)

Mesure de la température par thermorésistivité	Température (°C)	- Localisation des venues d'eau, des zones de perte de circulation - Séparation des aquifères	ouvert ou tubé, en eau
--	------------------	--	------------------------

Radioactivité provoquée (sonde à neutrons)

Détermination des rayons gamma issus de l'absorption de neutrons (créés par la source) par les noyaux d'hydrogène	Porosité (en %)	- Détermination de la porosité totale des formations	ouvert ou tubé, en eau
---	-----------------	--	------------------------

La qualité des renseignements fournis dépend de la compétence des opérateurs, de la fiabilité des matériels de mesures et d'enregistrement ainsi que de la qualité des interprétations.

La mise en oeuvre en est délicate. Elle nécessite de bonnes connaissances géologiques, un étalonnage fait à partir des échantillons de terrain, un décryptage correct.

Les résultats à en attendre sont profitables. Ils permettent de déterminer la nature des terrains, la porosité et le degré de saturation, la qualité des fluides, etc..

Une analyse complémentaire reste toujours possible grâce aux enregistrements sur bandes magnétiques apportant des renseignements irremplaçables pour la connaissance ultérieure et l'exploitation des ressources aquifères.

En tout premier lieu, il est nécessaire de vulgariser les interventions de chantier, susceptibles d'être mises en oeuvre le plus facilement et à moindre frais.

Des diagrapies peuvent être réalisées en utilisant un appareillage compact, facile à transporter, permettant d'exécuter les opérations élémentaires (résistivité, monoélectrode, polarisation spontanée, rayons gamma, neutrons, thermométrie) et apportant de très bons résultats en situations de difficultés moyennes.

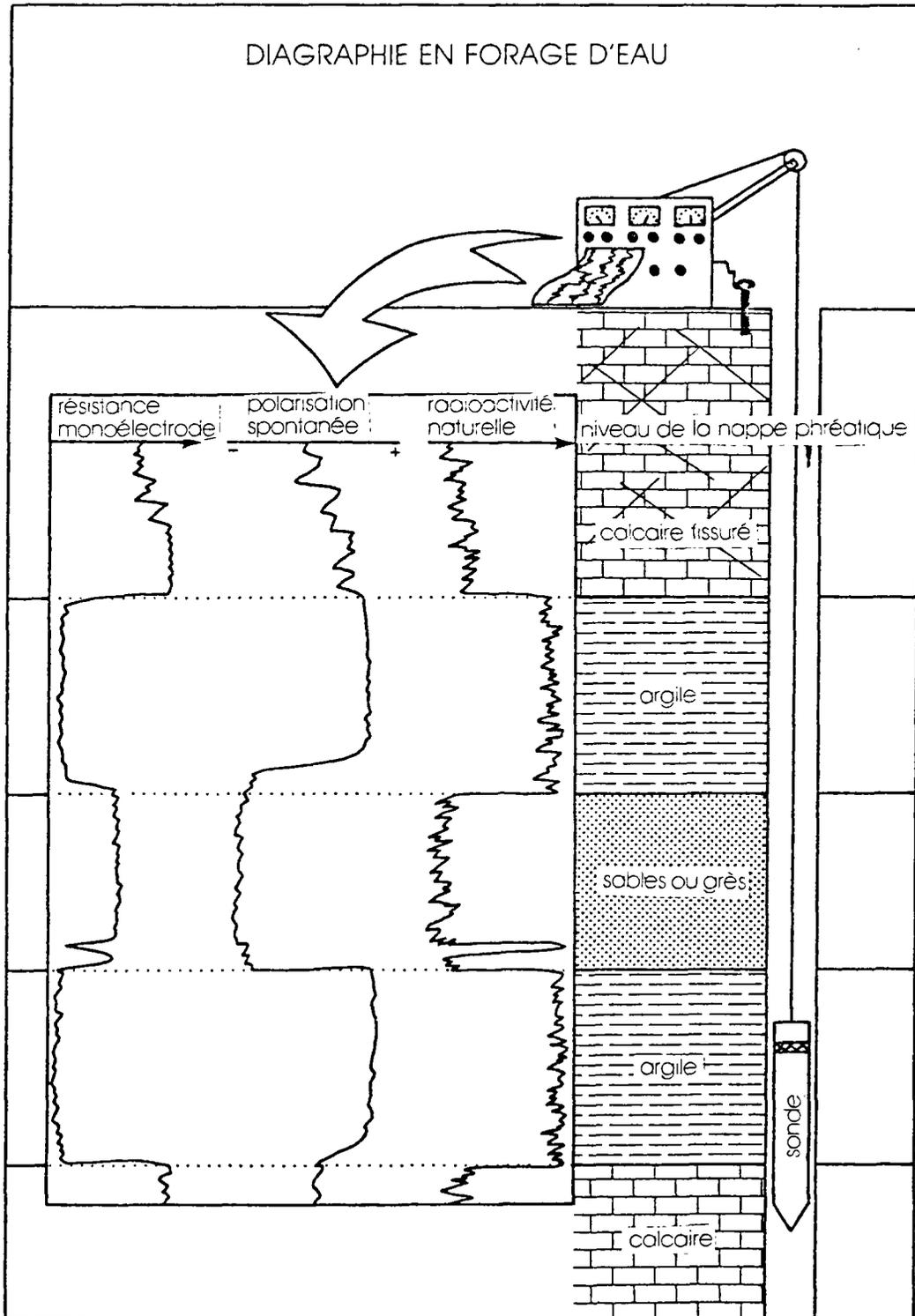


Figure 2

Ce matériel constitue un outil remarquable mais il est encore trop peu utilisé en France pour les forages d'eau.

DESINFECTION DES OUVRAGES TERMINES

Les nombreuses interventions que nécessite la construction des ouvrages telles que la mise en fonctionnement des outils, la pose des tubages et crépines, l'utilisation du fluide de circulation risquant d'être pollué, conduisent à opérer la désinfection des forages avant leur mise en exploitation.

L'artésianisme permet d'éviter cette intervention. Dans les autres cas, l'utilisation d'un ouvrage destiné à fournir de l'eau potable oblige à effectuer une stérilisation à l'eau chlorée avec une teneur qui atteigne si nécessaire 1 mg par litre.

L'opération est effectuée après l'installation de la pompe définitive.

Elle est renouvelée jusqu'au résultat convenable de l'analyse.

OUVRAGES ABANDONNES

Les sondages de reconnaissance et les forages abandonnés pourront servir d'ouvrages d'observation.

S'ils ne sont plus utilisés, ils devront être fermés efficacement et l'on empêchera toute circulation d'eau depuis la surface et toute inter-communication des aquifères.

ENCADREMENT DES PRESTATIONS D'ENTREPRISE

Conduite des chantiers

L'entrepreneur doit rendre compte avec précision et exactitude du déroulement des différentes phases de l'exécution.

A cet effet, il tient un carnet de chantier où sont consignées toutes les observations faites en cours de travaux :

- vitesse ou difficultés de perforation, nature des terrains rencontrés, profondeurs atteintes, incidents,
- niveaux auxquels des pertes ou des venues d'eau se sont produites, profondeur des niveaux stabilisés, etc..

Les relevés sont journaliers.

Les forages inachevés ou abandonnés sont décrits avec autant de précisions que les forages menés à bien.

L'entrepreneur ne procède à l'exécution de toute intervention spéciale, tubage, cimentation, développement, pose de crépines, de filtres, etc.. qu'en présence du directeur des travaux ou de son représentant mandaté à cet effet.

A l'achèvement complet du forage, l'entrepreneur remet au maître d'ouvrage le rapport définitif de l'exécution indiquant :

- dates de début et fin de chaque phase,
- méthode de perforation utilisée,
- caractéristiques de l'ouvrage,
- coupe stratigraphique,
- prélèvements d'échantillons,
- mesures de débit,
- analyses d'eau,
- relevé des équipements réalisés,
- mesures de protection.

Les renseignements fournis sont cotés à partir du niveau du sol.

Règlement des travaux

Il est préférable que les modalités de réalisation et de règlement relèvent de l'adoption d'un bordereau de prix unitaires tenant compte de toutes les sujétions de quelque nature qu'elles soient.

Les vitesses d'avancement sont définies par référence avec un terrain de consistance prévue.

Des plus-values fixent la rémunération à appliquer en cas de modification dans les prévisions.

Les prix horaires ou indemnités journalières sont accordés à l'entreprise pour l'intervention du personnel et du matériel, avec ou sans fourniture de force motrice selon le cas.

La rémunération en régie est réservée :

- aux interventions inopinées, telles que résultant de pertes dans le terrain aquifère,
- à l'exécution des travaux spéciaux, développement notamment,
- aux ralentissements imprévisibles,
- aux temps d'arrêt sur ordre du directeur des travaux.

Leur règlement intervient sur la base d'indemnités horaires fixées par le bordereau des prix.

Les ralentissements ou arrêts qui seraient le fait de l'entrepreneur ne peuvent donner lieu au paiement d'indemnités.

Dans le seul cas où les conditions d'exécution seraient parfaitement connues, la rémunération en régie pourrait être étendue à l'ensemble des travaux, en excluant toutefois les amenées et replis de matériel, mise en place et démontage, qui seront traités au forfait.

Il convient alors d'établir un programme très détaillé des travaux et de suivre en permanence le chantier.

Modification des conditions d'exécution

Données techniques

Le maître d'oeuvre peut se réserver expressément la possibilité de modifier les conditions d'exécution en cours de chantier si la construction de l'ouvrage résulte des connaissances acquises au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Le droit d'arrêter les travaux en deça ou de les faire poursuivre au-delà des profondeurs prévues peut être porté aux conditions contractuelles sans indemnité particulière mais de telles dispositions risquent d'entraîner un surcroît du montant des offres que les entreprises ont tendance à majorer pour couvrir les aléas.

Révision des prix

Les prix unitaires peuvent être considérés comme fermes et non révisables lorsque les délais d'exécution sont très courts (quelques mois).

Les formules applicables à la révision des prix figureront aux documents contractuels du marché.

Elles prendront en compte les salaires, charges sociales, fournitures en matériels de chantier, produits consommables et équipements.

L'index national est publié au B.O.S.P. sous la référence TP 04 : Sondages et forages, des prix de Génie civil.

Responsabilités et garanties

Le maître d'ouvrage confie à l'entrepreneur, sous la direction du maître d'oeuvre, l'exécution d'un ensemble de travaux qui doivent conduire à la réalisation d'un ouvrage captant, à caractéristiques définies. L'entrepreneur s'engage à exécuter les travaux sans interruption jusqu'à complet achèvement.

L'engagement de l'entrepreneur est une obligation de moyens, se rapportant à la qualité de l'ouvrage. (domaine d'application de l'article n° 792 du Code civil) et non de résultats, en ce qui concerne sa productivité.

Il garantit l'exécution de l'ouvrage aux profondeurs prévues, dans les diamètres de tubages fixés, pour les caractéristiques correspondant à l'équipement de complétion (cimentations - développement - filtres - pose de la crépine) et dans les limites de tolérances indiquées par les documents contractuels.

L'entrepreneur qui ne connaît ni les conditions hydrogéologiques, ni l'évolution de la piézométrie, etc.. n'est pas en mesure de garantir un débit.

REGLEMENTATION

Le droit des eaux souterraines est, en France, directement lié à celui de la propriété (article 552 du Code civil).

Le propriétaire du sol est propriétaire de l'eau souterraine qu'il peut atteindre par forage.

Différentes contraintes lui sont imposées réglementairement. Elles s'analysent comme suit :

- *Collectivités publiques* ou leurs concessionnaires, associations syndicales ou établissements publics

Les prélèvements d'eaux souterraines entrepris à leur profit dans un but d'intérêt général doivent être autorisés par un acte d'utilité publique déterminant le volume d'eau ainsi que les conditions de prélèvements autorisées (article 113 du Code rural).

- *Déclarations obligatoires*

- Les sondages, ouvrages souterrains ou travaux de fouille dont la profondeur dépasse 10 m sont soumis à déclaration auprès du service des Mines (article 131 du Code minier).
- Les échantillons, documents et renseignements intéressant la recherche, la production ou le régime des eaux souterraines tombent immédiatement dans le domaine public (article 60 de la loi du 16.12.1964).
- Toute installation permettant d'extraire des eaux souterraines à des fins non domestiques doit être déclarée si la capacité de prélèvement atteint ou dépasse 8 m³/h (article 40 de la loi du 16.12.1964).
- Tout projet de forage non visé par une procédure d'autorisation doit faire l'objet d'une déclaration à l'autorité sanitaire (article 10 du nouveau règlement sanitaire départemental type).

- *Evacuation des trop-pleins*

Lorsque par sondage ou travaux souterrains un propriétaire fait surgir des eaux sur son fonds, et si ces eaux ne sont pas totalement captées, les propriétaires des fonds inférieurs sont tenus de les recevoir.

Indemnité leur est due en raison de dommages provoqués par les écoulements (article 641 du Code civil).

- *Limitations*

- Le droit de fouille du propriétaire est restreint dans certains départements ; les prélèvements en volumes d'eau journaliers sont soumis à autorisation (application du décret du 8 août 1935).

Textes à consulter :

- décrets du 8 août 1935 et du 4 mai 1937, Seine, Seine-et-Oise, Seine-et-Marne.
- décret du 3 octobre 1958, Nord et Pas-de-Calais.

- décret du 21 avril 1959, Gironde.
- décret du 11 mars 1969, Guadeloupe.
- décret du 30 décembre 1961, Réunion.
- décret du 21 février 1973, Bouches-du-Rhône, Calvados, Pyrénées-Orientales, Seine Maritime, Territoire de Belfort.

- *Interdictions*

Aucun forage ne doit être effectué :

- à moins de cent mètres des nouveaux cimetières transférés hors des communes (décret du 7 mars 1808) ;
- dans les zones de périmètres de protection des points d'eau destinés à l'alimentation des collectivités humaines qui sont l'objet d'interdictions ou de réglementations (article L 20 du Code de la Santé publique).

°
° °

TERMES TECHNIQUES EMPLOYES EN FORAGE D'EAU

Ancrage :

Moyen employé pour fixer une colonne de tubes à la paroi du forage (cimentation par exemple), en utilisant une formation résistante comme zone d'ancrage.

Bentonite :

Argile ayant de fortes propriétés gonflantes et absorbantes. Ajoutée à l'eau à raison de 5 à 10 %, elle constitue un fluide de circulation (boue bentonique).

Boue de forage :

Fluide utilisé couramment en forage au rotary et injecté en continu au cours du forage. C'est un mélange d'eau, d'argiles et de certains produits.

Le débit du fluide est déterminé en fonction de la vitesse de remontée de la boue à obtenir. Cette vitesse doit être suffisante pour empêcher les plus gros éléments des déblais de retomber au fond (25 à 30 ms/min).

En cas de venues, la pression de la boue est maintenue, dans la mesure du possible, à une valeur à peine supérieure à celle de la formation pour éviter les risques de pertes (intrusions de la boue dans le terrain foré).

La densité de la boue est modifiée en tant que besoin. La boue est alourdie pour maîtriser des venues. Elle est allégée dans les zones à pertes, en terrains fracturés ou fissurés.

Cake :

Dépôt laissé sur les parois du forage après absorption par le terrain de l'eau libre de la boue, et qui assure la stabilité des parois.

Calibre :

Cylindre métallique utilisé pour vérifier un diamètre intérieur (de sondage, de tube, de tubage, etc..).

Carottage :

Prélèvement d'un échantillon de terrain dans un forage en utilisant un outil spécial appelé carottier.

Cimentation :

Moyen d'ancrer un tube à la paroi du forage, d'interdire les communications entre niveaux aquifères ou les circulations entre intérieur et extérieur d'une partie d'ouvrage (cimentation forage-tube ou tube-tube).

Le laitier de ciment utilisé est obtenu par un mélange d'eau et de ciment portland dans une proportion qui permet d'en modifier la densité. (par exemple 1 tonne de ciment sec et 480 l d'eau donnent 800 l de laitier à une densité de 1,85).

Colonne de tubes :

Suite continue de tubes de même diamètre équipant le forage.

Complétion :

Ensemble des opérations (forage, tubage, pose de la crépine, développement, etc..) faites sur une couche aquifère, commençant au forage de cette couche et se terminant quand elle est mise en production.

Complétion au toit : pour une formation consolidée, le forage est laissé à découvert dans l'aquifère.

Complétion au mur : pour une formation consolidée, le forage est crépiné dans l'aquifère.

Crépine :

Tube perforé destiné à maintenir en place le terrain aquifère et à capter l'eau.

Cutting :

Débris provenant des travaux de forage et évacués.

Découvert :

Partie de forage non tubé.

Dérive :

Inclinaison du forage par rapport à la verticale. Le foreur mesure l'angle de dérive à chaque changement d'outil, en utilisant par exemple un inclinomètre. Le même terme est utilisé pour les erreurs constatées sur les mesures de polarisation spontanée.

Derrick (angl.) :

Charpente métallique supportant l'appareil de forage.

Diagraphie :

Enregistrement dans un forage, en fonction de la profondeur, d'une grandeur physique déterminée.

Eruption :

Venue soudaine dans le forage. L'injection d'une boue plus dense permet d'en réduire la pression.

Filtrat :

Partie de la boue qui traverse la paroi du forage. Dans un aquifère, il en résulte un risque d'envahissement du terrain.

Fracturation hydraulique :

Procédé consistant à injecter dans une formation un liquide sous pression pour obtenir la fracturation de la roche.

Garniture de forage :

Ensemble des pièces qui soutiennent l'outil et transmettent le mouvement (tiges de forage et masses tiges).

Invasion :

Pénétration du fluide de circulation dans le terrain, ce qui provoque un colmatage par le filtrat.

Log :

Courbe enregistrée par diagraphie.

Log électrique (syn. : diagramme électrique) :

Enregistrement des résistivités et des différences de potentiels dans les forages.

Logging (syn. : diagraphie des sondages) :

Méthode de mesure de certains paramètres physiques des formations traversées par un forage.

Martin-Decker :

Matériel de contrôle portant le nom de son fabricant. Il équipe les engins de forage au "rotary" pour indiquer la tension du câble, donc le poids exercé sur l'outil, et permettre de régler l'avancement.

Masses-tiges :

Tiges de forte épaisseur, utilisées en forage rotary. Elles sont placées immédiatement au-dessus de l'outil pour faire poids sur lui et résister aux efforts de compression.

Massif filtrant (syn. : filtre) :

Matériau formé d'éléments calibrés (graviers - granulats), disposés dans l'espace annulaire compris entre le terrain et les parois de la crépine pour prévenir le colmatage et la réduction conséquente de l'efficacité de l'ouvrage.

Obturateur :

Dispositif permettant de fermer un forage en cas d'éruption (obturateur de sécurité).

Packer (angl.) :

Dispositif généralement constitué par un manchon déformable que l'on applique contre les parois du tubage. Comprimé, il fait joint d'étanchéité entre les parties à isoler.

Piézomètre :

Dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en un point donné d'un aquifère, qui indique la pression en ce point, en permettant l'observation ou l'enregistrement d'un niveau d'eau libre ou d'une pression.

Pompage d'essai :

Pompage effectué dans un forage, avec contrôle de l'évolution du débit pompé et des rabattements déterminés dans l'aquifère, avant et après le pompage, pour évaluer les paramètres de l'aquifère, d'après l'analyse de ces données.

Pouce (symbole ") :

Unité de longueur couramment employée. Une entente des pays anglo-saxons lui attribue la valeur de 25,4 mm.

Pression hydrostatique :

Pression exercée par un fluide sur le milieu qui le contient. Elle est exprimée en kgs/cm². Les foreurs utilisent également la livre par pouce carré (angl - symbole psi).

$$100 \text{ psi} = 7,031 \text{ kgs/cm}^2$$

La pression hydrostatique d'une colonne de boue correspondant à une profondeur de H mètres et pour une densité de boue d aura pour valeur :

$$p_h = \frac{H \times d}{10} \text{ kgs/cm}^2$$

Qualités d'acier - nommées nuances (ou grades) :

Pour chaque nuance dont dépend la résistance à la traction et pour un diamètre extérieur donné, le diamètre intérieur varie en fonction de l'épaisseur qui conditionne la résistance à l'écrasement (consulter les caractéristiques des tubes fournies par le fabricant).

Rabattement :

Diminution de charge hydraulique résultant d'un prélèvement d'eau, traduit en pratique par l'abaissement du niveau piézométrique par rapport au niveau naturel de la nappe.

Sabot :

Pièce épaisse placée à l'extrémité inférieure d'une colonne de tubage.

Tige creuse :

Utilisée en forage au "rotary" pour soutenir l'outil et permettre la circulation du fluide.

Trépan :

Outil de forage attaquant le terrain par percussion ou par rotation. En forage au "rotary", cet outil est un trépan à molettes, généralement tricône, ou un trépan diamanté.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GIBSON U.P. et SINGER R.D. (1971) - Water Well Manual. *Berkeley, Premier Press*
- CAMPBELL M.D. et LEHR J.H. (1973) - Water Well Technology. *New-York, Mc Grav Hill*
- DUPUIS J. (1979) - La technologie des forages d'eau. *CTGREF Antony*
- MABILLOT A. (1979) - Le forage d'eau - Guide pratique. *Edition de 1979 de "Crépinès Johnson France S.A."*
- Publication de la chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel. Contrôle géologique des forages et formulaires du géologue de chantier. *Editions Technip*
- Publication de l'Institut Français du Pétrole. Formulaire du foreur. *Edition Technip*
- Publié par Johnson Division, Saint Paul - Ground Water and Wells. *Minnesota 55165*
- Documents B.R.G.M.
- COTTEZ S. (1965) - Les massifs filtrants pour puits et forages d'eau. *65 DSA 26*
- TRUPIN G. (1969) - Manuel pratique des pompages d'essai. *69 SGN 258 HYD*
- LIENHARDT G., RICOUR J., GUDEFIN H. (1970) - Consignes relatives à la surveillance des sondages exécutés pour le compte du BRGM. *70 SGN 104 JAL*
- DAGUE Ph., GALLE CAVALONNI P. (1971) - Mesure des vitesses verticales de circulation dans les forages. Emploi du micromoulinet. *71 SGN 210 HYD*
- BOURGEOIS M. (1976) - Normes de l'A.W.W.A.. Traduction BRGM. *76 SGN 163 AME*
- BOURGEOIS M. (1976) - La corrosion et l'incrustation dans les forages d'eau *76 SGN 379 AME*
- BOURGEOIS M. (1977) - Reconnaissances des aquifères par forages. Estimation des caractéristiques des terrains et des fluides, en particulier à l'aide de diagraphies. *77 SGN 487 HYD*
- BOURGEOIS M. - Exécution des forages d'eau. Principales caractéristiques du matériel utilisé pour le travail à la rotation. (*à paraître*)
- FORKASIEWICZ J. (1978) - Essais de puits par paliers de débits. *78 SGN 040 HYD*
- SOLAGES S. (1979) - Calcul des ouvrages de captage. Choix et caractéristiques des colonnes de captage. *79 SGN 727 HYD*