Université Badji Mokhtar-Annaba
Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

Cours de 3ème année LMD

FORAGE D'EAU

LICENCE
Option: Hydrogéologie

Responsable de la matière : Pr. CHAFFAI Hicham

Année 2019/2020

S O M M A I R E

A. LES TECHNIQUES DE FORAGE UTILISEES EN EAU MINERALE

1. INTRODUCTION
2. LES METHODES DE FORAGE
2.1. FORAGE AU MARTEAU FOND DE TROU (MFT)
2.2. FORAGE AU MARTEAU FOND DE TROU AVEC TUBAGE À L'AVANCEMENT
2.3. FORAGE ROTARY CIRCULATION DIRECTE
2.4. FORAGE EN CIRCULATION INVERSE
2.5. FORAGE CAROTTE
2.6. FORAGE PAR BATTAGE
2.7. FORAGE PAR HAVAGE
3. CHOIX D'UNE METHODE DE FORATION - LES PARAMETRES A PRENDRE EN COMPTE
3.1. NATURE GEOLOGIQUE DES TERRAINS TRAVERSES
3.2. PROFONDEUR FINALE DE L'OUVRAGE
3.3. NATURE DE L'OUVRAGE REALISE (RECONNAISSANCE OU EXPLOITATION)
3.4. QUALITE DES FLUIDES DES RESERVOIRS
3.5. ENVIRONNEMENT DU CHANTIER
4. CONCLUSIONS

B. ÉQUIPEMENT DE FORAGE D'EXPLOITATION D'EAU MINERALE. APPROCHE METHODOLOGIQUE

1. INTRODUCTION
2. EQUIPEMENT DU FORAGE
2.1 TUBAGE PLEIN
2.1.1. OBJECTIF
2.1.2. TYPES DE TUBAGE. ASSEMBLAGE
2.2. CREPINE
2.2.1. OBJECTIF
2.2.2. TYPES DE CREPINES
2.2.3. METHODE DE MISE EN PLACE
3. MASSIF FILTRANT
3.1. OBJECTIF ET PRINCIPE
3.2. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DU MASSIF FILTRANT
3.3. PRECAUTIONS A PRENDRE DANS LE CADRE D'UN FORAGE D'EAU MINERALE
3.4. CONTROLE AU MOMENT DE LA MISE EN PLACE
3.5. CONTROLE A POSTERIORI
4. CIMENTATION

4.1. OBJECTIFS
4.2. METHODE DE REALISATION
4.3. CHOIX DU CIMENT
5. DEVELOPPEMENT D'OUVRAGE
5.1. OBJECTIF
5.2. TYPE DE DEVELOPPEMENT
5.3. CHOIX DE LA METHODE DE DEVELOPPEMENT
5.4. PRECAUTIONS A PRENDRE DANS LE CADRE D'UN FORAGE D'EAU MINERALE
5.5. CONTRÔLE AU MOMENT DE LA REALISATION
5.6. CONTROLE A POSTERIORI
6. NETTOYAGE ET DESINFECTION
6.1. PRODUIT MIS EN OEUVRE
6.2. PRECAUTION D'EMPLOI
6.3. CONTROLE AVANT ET APRES L'EMPLOI DU PRODUIT
7. CONTROLES DE RECEPTION - DOSSIER DES OUVRAGES EXECUTES
8. EQUIPEMENT D'EXHAURE DANS LE FORAGE
9. CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

A. Les techniques de forage utilisées en eau minérale

Résumé

Un ouvrage d'eau minérale utilise l'ensemble des techniques et des matériels existants dans le domaine du forage.

Cependant, la spécification de cette entreprise réside dans la prise en compte préalable de tous les paramètres afin d'optimiser l'ouvrage.

Cette sélection se base sur des considérations non seulement techniques liées à la géologie, à la géométrie de l'ouvrage et à la quantité d'information à acquérir, mais également sécuritaires concernant l'ouvrage mais aussi la ressource, et bien sûr financières.

1. INTRODUCTION

S'il existe différentes méthodes d'étude d'un gisement d'eau minérale, la réalisation d'un forage constitue la méthode la plus directe d'approche des caractéristiques du milieu souterrain en un point donné.

La réalisation d'un forage dans un gisement nécessite une programmation rigoureuse compte tenu des aspects suivants :

- s'agissant d'une action sur le sous-sol, elle constitue un risque pour le milieu souterrain et pour les différentes entités géologiques concernées par la foration. Ce risque peut concerner le transfert d'éléments indésirables vers certains niveaux producteurs (contamination chimique ou bactériologique). Il peut également se produire des phénomènes de mélanges entre différents niveaux pouvant induire des modifications de qualité voire de quantité (jusqu'à la perte d'une ressource) ;
- s'agissant d'une action ayant un objectif technique déterminé et représentant un coût en général non négligeable, l'ouvrage doit être conçu pour une acquisition optimale de données compte tenu des moyens pouvant être mobilisés.

Ainsi, toute action de foration entreprise sur un gisement d'eau minérale doit s'accompagner d'une réflexion préalable sur :

- la mise en oeuvre de la technique de foration la plus appropriée ;
- la réalisation d'un suivi technique adapté ;
- la mobilisation d'une entreprise de forage qualifiée pour le type de forage envisagé.

2. LES METHODES DE FORAGE

Il existe de nombreuses méthodes de foration dont la mise en oeuvre dépend de paramètres très divers. Le chapitre présente les méthodes de forages en tant que telles avec leurs avantages et inconvénients relatifs. Le chapitre suivant précisera les modalités de sélection de ces méthodes selon les critères usuels pour le domaine de l'eau minérale.

2.1. FORAGE AU MARTEAU FOND DE TROU (MFT)

Principe

Cette méthode de forage utilise la percussion assortie d'une poussée sur l'outil qui se trouve lui même en rotation. L'énergie utilisée pour actionner cet outillage est l'air comprimé à haute

pression (10-25 bars). C'est un procédé très intéressant en recherche hydrogéologique et principalement en terrains durs.

Un marteau pneumatique équipé de taillants est fixé à la base d'un train de tiges et animé en percussion par envoi d'air comprimé dans la ligne de sonde, d'où le nom de "marteau fond de trou".

Avantages

- Avancement rapide et profondeur d'investigations pouvant dépasser les 300 m de profondeur (fonction du diamètre et de la puissance du compresseur d'air) ;
- Bonne observation des cuttings (coupe géologique) et des zones productrices (suivi foration) ;
- Fluide de forage (air) bien adapté au forage d'eau en général de par l'absence de produit de foration (pas d'interférence entre la ressource et des boues ou de l'eau).

Inconvénients

- le fluide "air" peut perturber en foration les observations relatives à la qualité du fluide d'un niveau producteur par oxydation d'éléments ou en occultant des venues de gaz. La confirmation de la qualité du fluide (eau et gaz) d'un niveau producteur doit fréquemment être réalisée par pompage associé ;
- Interprétation délicate du niveau de production d'un horizon reconnu (débit) par mesure en soufflage (air lift) à l'aide de l'équipement de foration. Les données obtenues en foration MFT, quant aux débits des horizons traversés, doivent être prises en compte avec réserve; Il convient de considérer que les débits obtenus en fonction à l'air sont toujours optimistes ;
- Procédé peu adapté dans les terrains non consolidés ou plastiques ;
- Risque de formation de bouchons de cuttings, nécessitant de fréquents nettoyages du trou par soufflage. Ce phénomène n'existe pas lorsque l'ouvrage est totalement sec ou lorsque le débit des niveaux producteurs est suffisant pour permettre un bon nettoyage par circulation ;
- Nécessité d'utilisation de compresseurs très puissants voire de surpresseurs en cas de foration sous des hauteurs d'eau importantes.
- Mauvaise identification de chaque niveau producteur en cours de foration, le fluide reccueilli en tête d'ouvrage intégrant l'ensemble des horizons traversés.

Il convient de noter que la foration MFT à l'air est parfois couplée à l'emploi de mousse de forage (injectée dans le circuit d'air) pour favoriser la tenue des parois et/ou la remontée des cuttings. S'agissant d'un contexte "eau minérale", le choix d'une mousse "inerte" doit être une préoccupation pour l'opération.

2.2. FORAGE AU MARTEAU FOND DE TROU AVEC TUBAGE À L'AVANCEMENT

Principe

Identique à la technique MFT "classique" exposée ci-avant, cette méthode concerne la mise en place d'un tubage des parois du trou au fur et à mesure de sa foration.

Elle met en oeuvre un taillant pilote avec aléseur excentrique qui permet de forer des trous d'un diamètre légèrement supérieur au diamètre extérieur des tubes. Le tubage est ainsi enfoncé progressivement à la suite de l'aléseur sous l'effet de son propre poids et de l'énergie de percussion du marteau. Les tubes sont solidarisés entre eux soit par soudure, soit par filetage.

Le taillant excentrique se déploie par rotation dans le sens des aiguilles d'une montre, une rotation en sens inverse en fin de foration permet son repli et la remontée de la garniture.

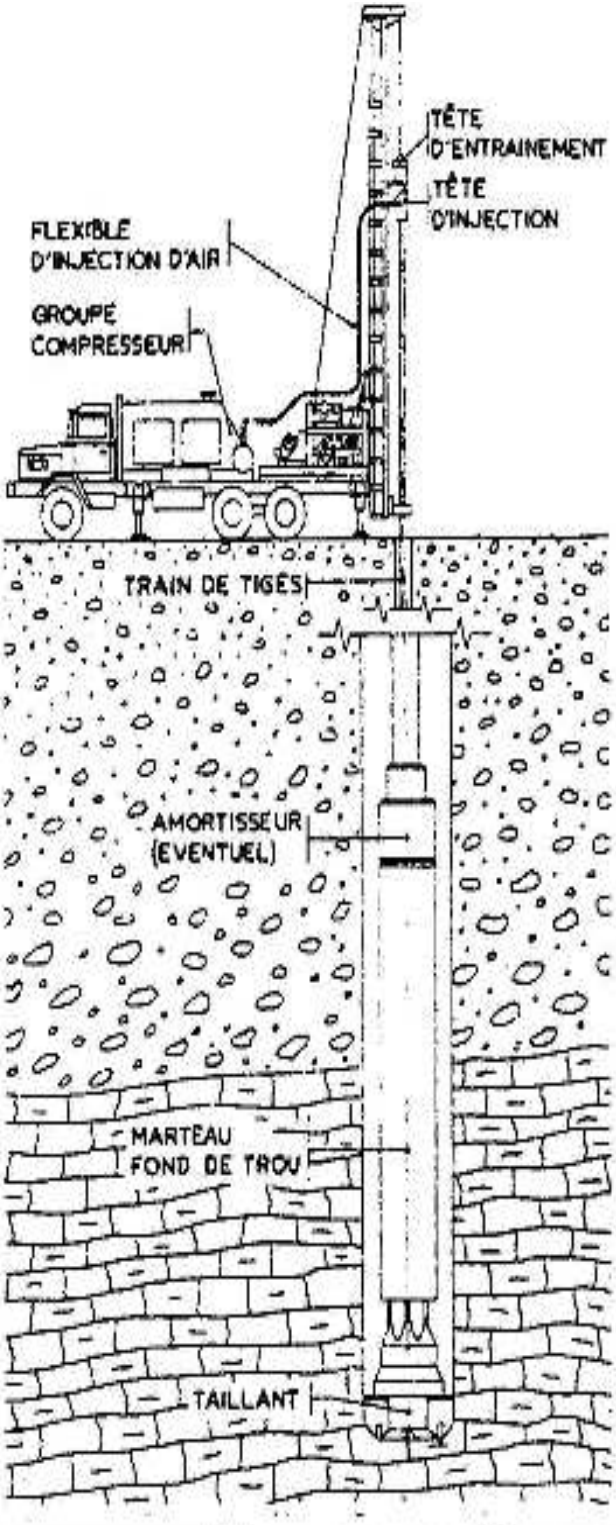
Comme en foration au marteau fond de trou classique, l'évacuation des cuttings est là aussi assurée par la remontée de l'air, ici entre tiges et tube.

Avantages

- Possibilité d'utiliser une foration air dans un contexte géologique peu stable ;
- Bonne observation des cuttings et zones productrices ;
- Meilleure individudalistion des niveaux producteurs au moment de la foration, sans mélange avec des niveaux supérieurs partiellement obturés par le tubage mis en place.

Inconvénients

- idem au MFT classique à l'exception de la foration dans les terrains non consolidés.



Principe du forage au marteau fond-de-trou (D'après document DAMAT, 1981)

Fig. 1 : Schéma de principe foration Marteau Fond de Trou (M.F.T)

2.3. FORAGE ROTARY CIRCULATION DIRECTE

Principe

La méthode de foration rotary utilise un outil (trépan) monté au bout d'une ligne de sonde (tiges vissées les unes aux autres), animé d'un mouvement de rotation de vitesse variable et d'un mouvement de translation verticale sous l'effet d'une partie du poids de la ligne de sonde ou d'une pression hydraulique.

Le mouvement de rotation est imprimé au train de tiges et à l'outil par un moteur situé sur la machine de forage en tête de puits. Les tiges sont creuses et permettent l'injection de boue au fond du forage.

Les outils utilisés en rotation sont des trépans de plusieurs types en fonction de la dureté des terrains rencontrés (outils à lames, outils à pastilles, molettes ou tricône, outils diamantés ou à carbures métalliques).

Au-dessus du trépan, on peut placer une ou plusieurs masses-tiges très lourdes qui accentuent la pression verticale sur l'outil et favorisent la pénétration et la rectitude du trou.

Le forage rotary nécessite l'emploi d'un fluide de forage préparé sur le chantier. Dans le cas de la circulation directe, le fluide est injecté en continu sous pression dans les tiges creuses de la ligne de sonde, il sort par les évents de l'outil et remonte à la surface dans l'espace annulaire (entre les tiges et les parois du trou).

Avantages

- La profondeur du forage peut être très importante, la foration n'est pas perturbée par les terrains peu stables ou plastiques, sous réserve de l'utilisation d'un fluide de forage adapté.
- Ce système permet un bon contrôle des paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité de la boue, débit d'injection de la boue) en fonction des terrains à traverser.
- Le forage au rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôt d'un cake.

Inconvénients

- Nécessité d'un fluide de forage qui ne permet pas d'observation directe de la qualité des eaux des formations traversées ;
- colmatage possible des formations aquifères par utilisation de certaines boues (bentonite) ;
- difficulté d'observation des cutting, la présence de tamis vibrants en circuit retour diminue sensiblement cet inconvénient.

2.4. FORAGE EN CIRCULATION INVERSE

Principe

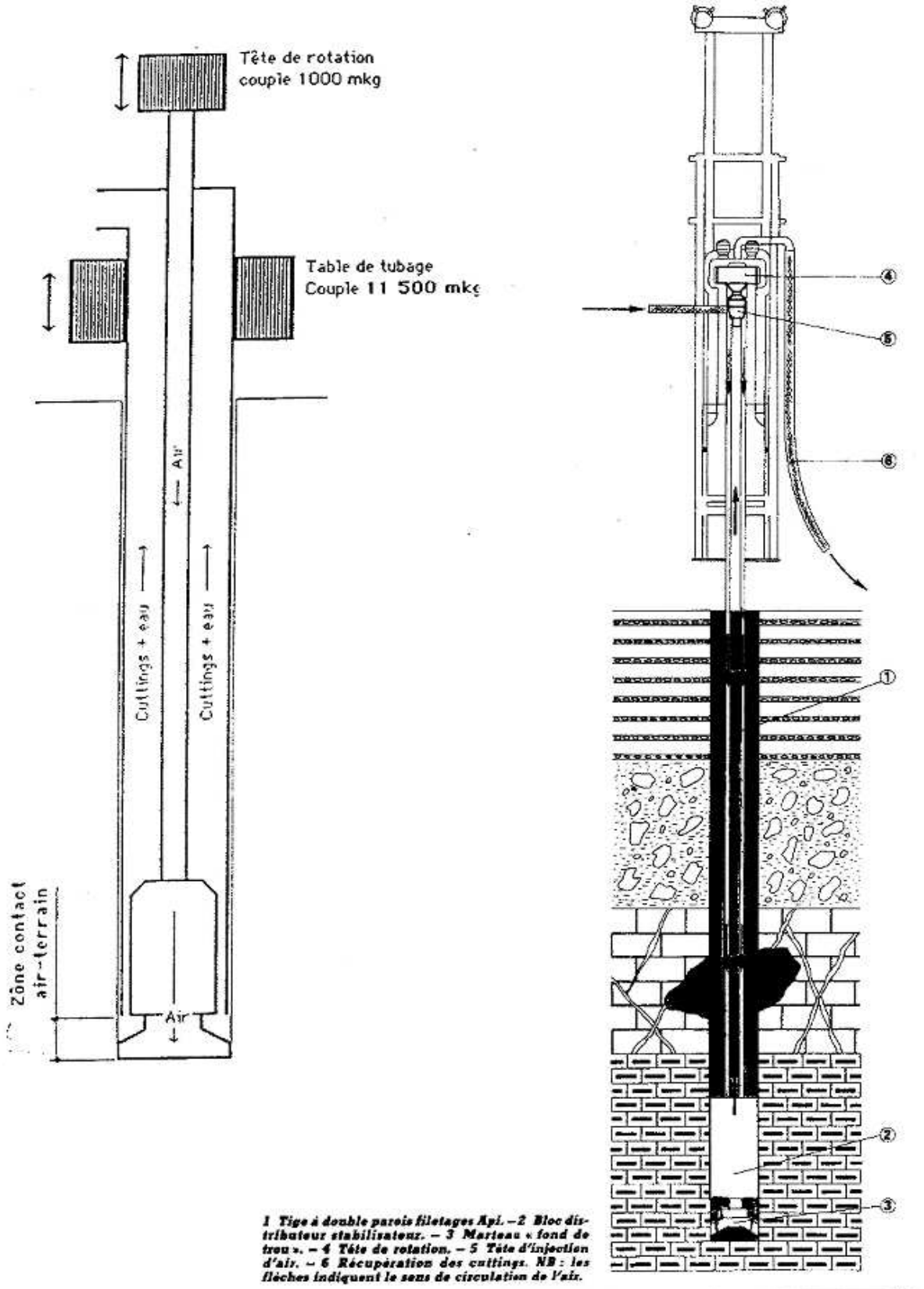
Cette méthode de foration diffère des méthodes précédentes par une circulation du fluide (boue, eau ou air) dans l'espace annulaire (entre la formation et les tiges) avec remontée des cuttings par l'intérieur du train de tiges. Il existe également des tiges à double paroi qui assurent l'injection et la remontée du fluide par l'intermédiaire des seules tiges.

Avantages

- Information géologique plus précise et quasi instantanée. Les cuttings recueillis en surface proviennent du seul fond du trou sans mélange avec des cuttings provenant éventuellement de l'érosion du trou au cours de la remontée ;
- Information géologique continue. La traversée de zones fissurées, fracturées ou caverneuses, se traduit assez souvent par des pertes partielles (ou totales) de fluide de circulation (air, eau, boue) dans les techniques de foration à circulation directe. La remontée des cuttings par le train de tiges diminue fortement les risques de pertes de fluide et de cuttings ainsi que les éventuels colmatages ou contamination des aquifères traversés ;
- Meilleure individualisation des arrivées successives de fluide en cours de foration. Seul le niveau en cours de foration est testé au moment du passage de l'outil, les mélanges avec des niveaux supérieurs sont très réduits.

Inconvénients

- Présence d'un fluide de forage et de risque de colmatage (idem circulation directe).
- S'agissant d'une reconnaissance de niveaux producteurs au moment de sa foration, le suivi d'un chantier en circulation inverse nécessite un contrôle continu et des prises de décision adéquates pour caractériser les différents niveaux (arrêt de foration et circulation ou pompage dès observation particulière). Il existe un risque d'occulter des informations importantes sur un niveau producteur d'épaisseur réduite par passage trop rapide.



1 Tige à double parois filetages Api. – 2 Bloc distributeur stabilisateur. – 3 Marteau « fond de trou ». – 4 Tête de rotation. – 5 Tête d'injection d'air. – 6 Récupération des cuttings. NB : les flèches indiquent le sens de circulation de l'air.

Fig. 2 : Schémas de principe foration tubage à l'avancement et circulation inverse

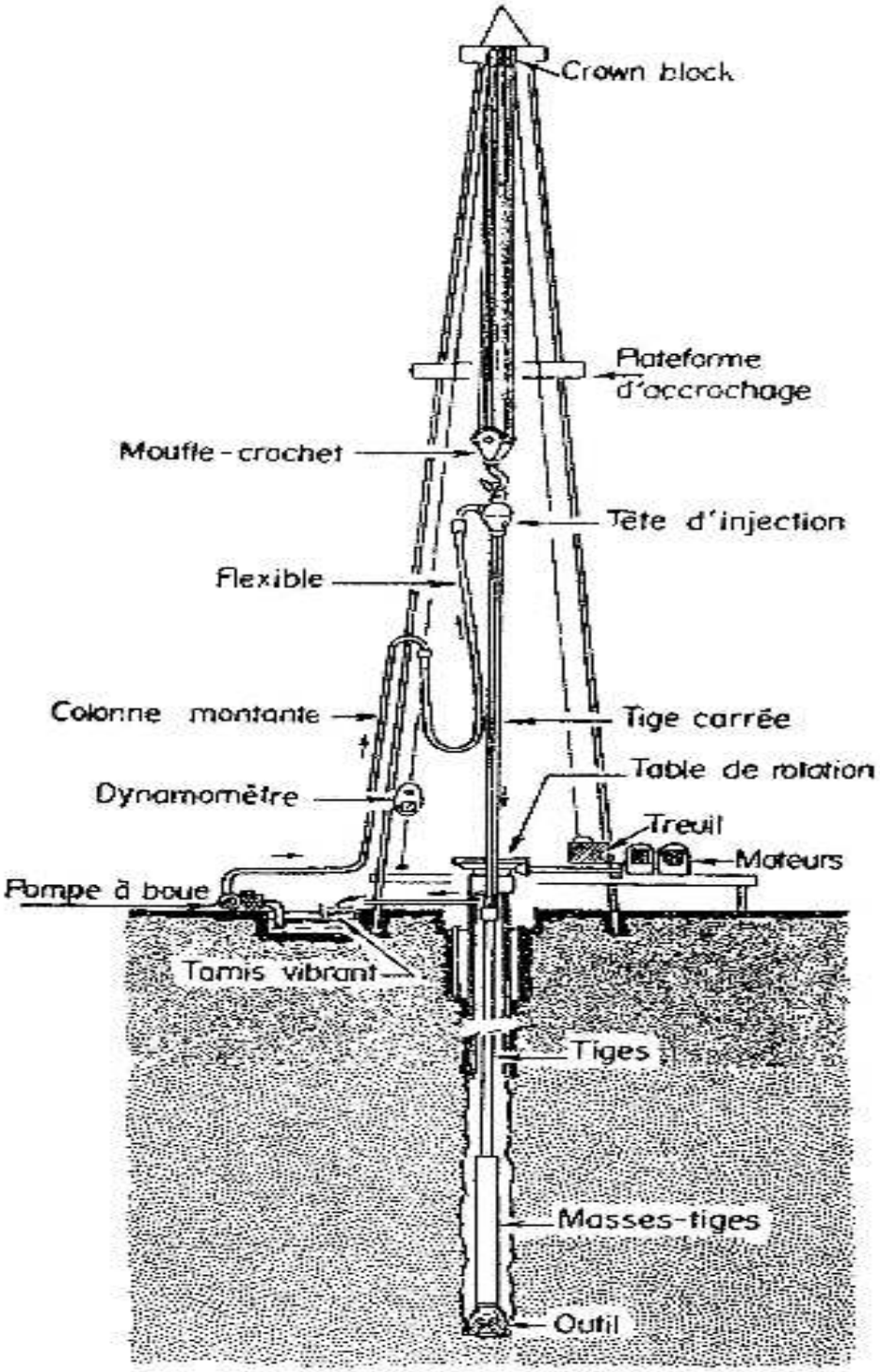


Fig. 3 : Dispositif schèmatique d'un atelier de forage rotary

2.5. FORAGE CAROTTE

Principe

Cette méthode consiste en la réalisation d'un ouvrage à l'aide d'un outil spécial, le carottier, destiné à récupérer la formation en place sans destruction.

Avantages

- Observations géologiques de qualité optimale.
- Couplé à un dispositif d'orientation de la carotte, l'échantillon recueilli en zones fracturées permet une analyse des directions de fracturation.

Inconvénients

- Coût élevé ;
- Diamètre réduit ;
- Pourcentage de récupération des formations fonction de la nature des terrains (faible en structure non consolidée).

2.6. FORAGE PAR BATTAGE

Principe

La méthode consiste à soulever un outil lourd (trépan) et à le laisser retomber sur le terrain à traverser. La hauteur et la fréquence de chute varient selon la dureté des formations.

On distingue deux types de battages : le battage au treuil et le battage au câble. Cette dernière méthode est la plus courante. Le trépan est suspendu à un câble qui est alternativement tendu et relâché. Les mouvements sont rapides et le travail de l'outil se fait plus par un effet de martèlement dû à l'énergie cinétique que par un effet de poids comme pour le battage au treuil.

Un émerillon permet au trépan de pivoter automatiquement sur lui-même à chaque coup. Le trou est nettoyé au fur et à mesure de l'avancement par descente d'une soupape permettant de remonter les débris (cuttings). Ce procédé permet de réaliser des forages sans utilisation d'eau ou de boue.

Avantages

- C'est un procédé simple et relativement peu coûteux (investissement généralement plus faible que pour les autre procédés de foration) ;
- Il n'y a pas de fluide de forage (boues) et pas de risques de pollution de la nappe ;
- Le trépan peut être rechargé, reforgé et affûté sur le chantier ;

- C'est une méthode bien adaptée pour les forages de moyenne profondeur ;
- Les résultats sont très bons dans les terrains fissurés (pas de pertes).

Inconvénients

- Vitesse d'avancement assez faible induisant un coût "suivi travaux" en proportion ;
- Méthode peu adaptée dans les terrains plastiques ou boulants dans lesquels le tubage à l'avancement est nécessaire ;
- Difficultés pour équilibrer des venues d'eau artésiennes jaillissantes.
- Absence d'information sur les niveaux producteurs (qualité - production) sinon par mise en place de dispositif de pompage en parallèle à la foration.

2.7. FORAGE PAR HAVAGE

Principes

Le forage par havage est plus connu sous le nom de procédé Benoto : dans ce type de forage par curage ou havage, les tubages pénètrent dans la formation sous l'effet de leur propre poids ou sous l'action de vérins hydrauliques. Une benne preneuse "vide" progressivement l'intérieur du tubage tant que celui-ci se trouve au-dessus du niveau statique. Au dessous du niveau statique, l'emploi d'une soupape est recommandé.

En présence d'éléments grossiers ou de blocs, l'utilisation d'un trépan tombant en chute libre permet de briser l'obstacle. Il est également possible d'utiliser des vibreurs hydrauliques pour faciliter la descente ou l'arrachage des tubages.

Avantages

- Avancement rapide à faible profondeur dans des formations meubles, notamment alluvionnaires (en l'absence d'éléments grossiers) ;
- Réalisation d'ouvrages en gros diamètre (peu répandus en eau minérale).

Inconvénients

- Méthode inadaptée aux terrains durs ;
- Frottement du tubage mis en place à l'avancement ; profondeur réduite
- Difficulté pour arracher les tubages de soutènement après la mise en place des crépines et du massif filtrant.

3. CHOIX D'UNE METHODE DE FORATION – LES PARAMETRES A PRENDRE EN COMPTE

Le mode de foration à retenir pour la réalisation d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres à prendre en compte au moment de la conception de l'ouvrage.

La spécificité du domaine des eaux minérales dans le choix de la méthode de foration réside dans le fait que l'objectif est de capter une ressource très définie en terme de qualité. Ceci oblige à choisir un mode de foration qui permet de bien isoler les horizons "parasites" en réalisant des cimentations adéquates. D'autre part, la foration ne devra pas altérer le niveau producteur que l'on souhaite capter (la foration à l'air sera généralement privilégiée).

3.1. NATURE GEOLOGIQUE DES TERRAINS TRAVERSES

Il convient d'apprécier la stabilité des formations concernées (roches meubles, roches dures), la présence de discontinuités (fractures, cavité).

- Pour des terrains alluvionnaires peu stables, on choisira une méthode de foration à l'air avec tubage à l'avancement. Dans des cas particuliers, on pourra utiliser la foration rotary boue (moins recommandée).
- Pour des terrains consolidés, on choisira une foration à l'air avec possibilité de tuber s'il existe des cavités par exemple.

3.2. PROFONDEUR FINALE DE L'OUVRAGE

Selon la profondeur objective, il convient de réaliser des forations en diamètre suffisant pour permettre la mise en place d'éventuels tubages qui permettent de poursuivre le forage après des zones instables.

- Les méthodes de battage et havage ainsi que celles avec tubage à l'avancement sont limitées en profondeur, elles pourront être utilisées pour faire les avant-trous ;
- En terrains durs, pour des forages de grandes profondeurs, on travaillera au MFT ;
- En terrain présentant des risques d'instabilité, et à fortes profondeurs, on peut être amené à choisir une foration rotary boue.

Cependant, on ne privilégiera pas cette méthode compte tenu d'une part de la difficulté d'identifier les niveaux producteurs présentant la qualité d'eau requise (agrément) et d'autre part, des éventuelles interférences entre le fluide utilisé en foration (boues) et les eaux de l'aquifère.

3.3. NATURE DE L'OUVRAGE REALISE (RECONNAISSANCE OU EXPLOITATION)

En phase de reconnaissance, l'objectif prioritaire sera l'acquisition de données sur la géologie et les niveaux producteurs. On prévilégiera dans ce cas les possibilités offertes quant à la qualité du suivi de la foration (foration à l'air).

Pour la réalisation d'un forage d'exploitation l'accent sera mis sur le captage d'un niveau producteur déterminé qu'il convient d'exploiter à un débit donné et de protéger de façon la plus efficace vis-à-vis de son environnement. Le diamètre de l'ouvrage sera défini en tenant compte des contraintes d'exploitation de l'ouvrage (diamètre des groupes de pompage, instrumentation).

Le choix de la méthode de foration sera fait pour obtenir un trou parfaitement calibré dans lequel les tubages (crépinés et pleins) pourront être positionné au mieux avec mise en place optimum des graviers face aux crépines et/ou des cimentations derrière les tubages pleins de protection.

3.4. QUALITE DES FLUIDES DES RESERVOIRS.

Dans certains cas particuliers (artésianisme jaillissant, gaz sous pression), la qualité du fluide du réservoir peut induire des précautions spécifiques (contrôle des pressions par la boue, système anti-éruptifs type BOP).

La foration rotary à la boue pourra être privilégiée dans certains cas où le risque d'éruption est grand. Cette technique permet en effet, par augmentation de densité de la boue, de contenir les effets de pressions.

3.5. ENVIRONNEMENT DU CHANTIER

Selon le lieu de réalisation de l'ouvrage (milieu urbain ou zone inhabitée) et la place disponible pour réaliser la plate-forme de forage, les matériels à utiliser pourront être sélectionnés selon leur encombrement, leur niveau sonore.

4. CONCLUSIONS

Les méthodes de forage sont diverses et doivent être adaptées au but poursuivi lors de la réalisation d'un ouvrage dans un gisement d'eau minérale.

Le forage constitue la méthode d'approche directe des caractéristiques d'un gisement que ce soit pour l'acquisition de données, où il s'agit alors de parfaire la connaissance d'un site ou

que ce soit pour l'exploitation d'un niveau identifié, quand il s'agit de préciser des conditions de production.

Ainsi, si les techniques de forages à mettre en oeuvre doivent être étudiées au cas par cas, la conception d'un forage doit entrer dans la réflexion globale d'étude d'un gisement et le suivi de l'opération doit faire l'objet d'une méthodologie précise. Sous réserve d'une prise en compte de ces deux conditions, le forage apportera des informations utiles sur le gisement et l'opération pourra ainsi être valorisée.

B. Équipement de forage d'exploitation d'eau minérale. Approche méthodologique

RÉSUMÉ

L'équipement de forage d'exploitation d'eau minérale constitue la dernière étape avant la mise en production de la ressource d'un gisement. Cette étape est aussi essentielle que celle qui a permis d'identifier le niveau aquifère à capter puisqu'il s'agit de garantir la qualité de l'eau minérale exploitée au cours du temps.

Ainsi les modalités d'équipement d'un forage et le choix des matériaux doivent-il être abordés de manière critique vis à vis des particularités de l'eau minérale (caractéristiques physico-chimiques) ainsi que de l'environnement particulier du niveau aquifère identifié (interférence) de manière à assurer une exploitation conforme aux autorisations réglementaires.

La mise en place de l'équipement d'un forage d'exploitation d'eau minérale exige, tout comme la réalisation du forage en tant que tel et son suivi de réalisation, une attention particulière pour un strict respect des règles de l'art dans un souci permanent de QUALITÉ.

1. INTRODUCTION

Le forage d'exploitation d'eau minérale a pour objet de délivrer en surface une qualité et un débit d'eau donné en préservant cette qualité depuis le gisement jusqu'à la tête de forage.

Comme il a été précisé dans l'approche méthodologique consacrée au suivi de forage, les consignes de sécurité et d'hygiène spécifique au forage d'eau minérale ne s'arrêtent pas à la fin de la foration, mais sont à mettre en oeuvre jusqu'à la livraison de l'ouvrage définitif.

Les nombreuses informations accumulées lors du suivi de foration, sur la nature du fluide, la nature du réservoir, la nature de l'encaissant vont permettre d'optimiser la colonne de captage prévue initialement dans le cahier des charges.

L'équipement définitif de forage d'exploitation d'eau minérale, dernière pièce d'une démarche complexe représente un élément essentiel de la chaîne de qualité.

Non seulement les équipements spécifiés et mis en oeuvre doivent répondre aux contraintes liées aux caractéristiques de la ressource, du forage réalisé et aux objectifs de production, mais encore ils doivent garantir une longévité à cet ouvrage.

Ces différents équipements sont sommairement décrits en mettant l'accent sur les spécificités liées aux eaux minérales.

2. ÉQUIPEMENT DU FORAGE

2.1 TUBAGE PLEIN

2.1.1. Objectif

Il a pour fonction :

- de canaliser l'eau depuis la ressource jusqu'en surface,
- de tenir mécaniquement les terrains traversés,
- de participer à l'individualisation de l'eau captée du reste du forage ou de la surface,
- de permettre la fixation du matériel de tête d'ouvrage (supportage de pompe immergée, raccordement au réseau de surface).

Le diamètre du tubage ou des différents tubages sera lié à la profondeur finale, à la qualité des terrains traversés et au débit de production espéré.

Les tubages peuvent être provisoires (recouverts par l'équipement définitif) ou définitifs (servant de canalisation), et dans ce cas un diamètre uniforme sur le forage sera préféré.

2.1.2. Types de tubage. Assemblage

Les tubages se caractérisent par leur diamètre, leur épaisseur, leur méthode de fabrication pour les tubages métalliques (tubes étirés ou soudés) et leurs techniques d'assemblage qui peut s'effectuer par filetage, soudage, bride ou différents raccords particuliers.

La sélection de ces assemblages doit permettre de limiter toute zone de rétention de fluide et de turbulence.

Toute multiplication de matériaux différents (joints, soudures) est à éviter.

2.2. CRÉPINE

2.2.1. Objectif

Schématiquement la crépine est un tube ajouré laissant le passage à l'eau tout en maintenant la formation. En tant qu'interface avec la ressource, elle constitue l'élément principal de l'équipement d'un ouvrage d'exploitation.

Sa longueur, son type, sa nature sont directement fonction de l'épaisseur de la formation à capter, du niveau de rabattement maximal, de la nature de l'aquifère.

Elle devra répondre aux critères suivants :

- permettre la production de fluide sans particule fine,
- rester inerte vis à vis du fluide à capter (interaction de matériaux mais aussi turbulence),
- résister à la pression d'écrasement exercée par la formation aquifère en cours d'exploitation,
- ne pas risquer un vieillissement prématuré,
- induire des pertes de charges minimales.

2.2.2. Types de crépines

Une crépine se caractérise :

- par la nature du matériau qui la constitue,
- par la forme des ouvertures,
- par la taille des ouvertures,
- par le coefficient d'ouverture.

Les caractéristiques géométriques (taille, densité et forme des ouvertures) dépendent de la nature et des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère définies lors du suivi de forage (analyse granulométrique, diagraphie...).

Dans certains types de terrain très consolidés comme des carbonates ou des terrains cristallins, la présence de crépine n'est pas forcément utile, elle peut induire une augmentation des pertes de charges quadratiques (liées à l'ouvrage).

Lors de la réalisation de forages d'eau minérale les deux types de crépines le plus fréquemment utilisés sont (Fig. 1 - page 4 bis) :

- les crépines perforées (à trous oblongues, à nervures repoussées, ou à fentes rectangulaires pour le PVC). Le coefficient d'ouverture est limité de 10 à 20 %,
- les crépines à fente continue sur toute la longueur de la crépine, obtenue par enroulement hélicoïdal d'un "fil enveloppe profilée" soudé sur des génératrices métalliques verticales. Le coefficient d'ouverture est nettement supérieur (jusqu'à 50 %). Ce type de crépine n'existe pas en PVC.

2.2.3. Méthode de mise en place

Les ouvrages de captage dans leur majorité sont de l'un des deux types suivant :

- ouvrage à équipement monolithique (1 seul diamètre), les crépines sont alors descendues au bout des tubages pleins,
- ouvrage télescopé à crépine de diamètre inférieur à celui du tubage d'occultation des niveaux supérieurs.

L'assemblage des crépines se fait soit alors par filetage ou par soudage. La présence de crépines simplement posées en fond de trou est à proscrire dans la mesure du possible car ceci peut être la cause de by-pass par circulation dans l'annulaire.

3. MASSIF FILTRANT

3.1. OBJECTIF ET PRINCIPE

Il s'agit de mettre en place, entre la crépine et l'aquifère, un massif de gravier dont la granulométrie doit être élevée (limitation de perte de charge) tout en assurant une filtration efficace.

La mise en place d'un massif de gravier permet d'augmenter la taille des ouvertures des crépines (ou slot), de réduire la vitesse de circulation de l'eau à l'entrée de la crépine et donc d'augmenter le débit de production ainsi que la longévité de l'ensemble.

3.2. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DU MASSIF FILTRANT

Le massif sera constitué d'un matériau propre sans élément fin, de forme arrondie pour limiter les pertes de charge. Enfin, il sera caractérisé par une courbe granulométrique précise définie à partir de la courbe granulométrique propre de l'aquifère.

Il ne sera pas nécessaire de mettre en place de massif filtrant artificiel :

- lorsque la granulométrie de l'aquifère est grossière, on peut réaliser un développement naturel ou auto développement,
- lorsque l'encaissant est consolidé.

Par contre, lorsque dans les aquifères consolidés ou semis consolidés, présentent des risques d'éboulements, la mise en place d'un massif de blocage n'a pas un effet de filtre mais de soutènement.

3.3. PRÉCAUTIONS A PRENDRE DANS LE CADRE D'UN FORAGE D'EAU MINÉRALE

Tout comme pour les crépines, la physico chimie du fluide capté doit être prise en compte pour choisir un massif filtrant dont les éléments n'interféreront pas avec l'eau minérale (sable siliceux).

3.4. CONTROLE AU MOMENT DE LA MISE EN PLACE

Il faudra s'assurer :

- de la conformité du massif filtrant (qualité et quantité) avec les prescriptions retenues,
- du nettoyage et désinfection du massif de gravier avant sa mise en place,
- de la mise en place du massif dans les règles de l'art.
- dans le cas d'un forage peu profond, le massif de gravier est introduit entre le tube d'extension de la crépine et le tube de protection qui est remonté au fur et à mesure du remplissage annulaire par le gravier,
- dans le cas d'un forage profond, le massif de gravier est mis en place par un circuit continu sous pression, la cote supérieure du massif de gravier doit recouvrir en partie le tube plein pour disposer d'une réserve de gravier et jouer pleinement son rôle de filtre.

3.5. CONTRÔLE A POSTERIORI

On doit s'assurer que lors des pompages d'essai après les phases de développement, le pourcentage de fines reste en dessous des limites fixées au cahier des charges.

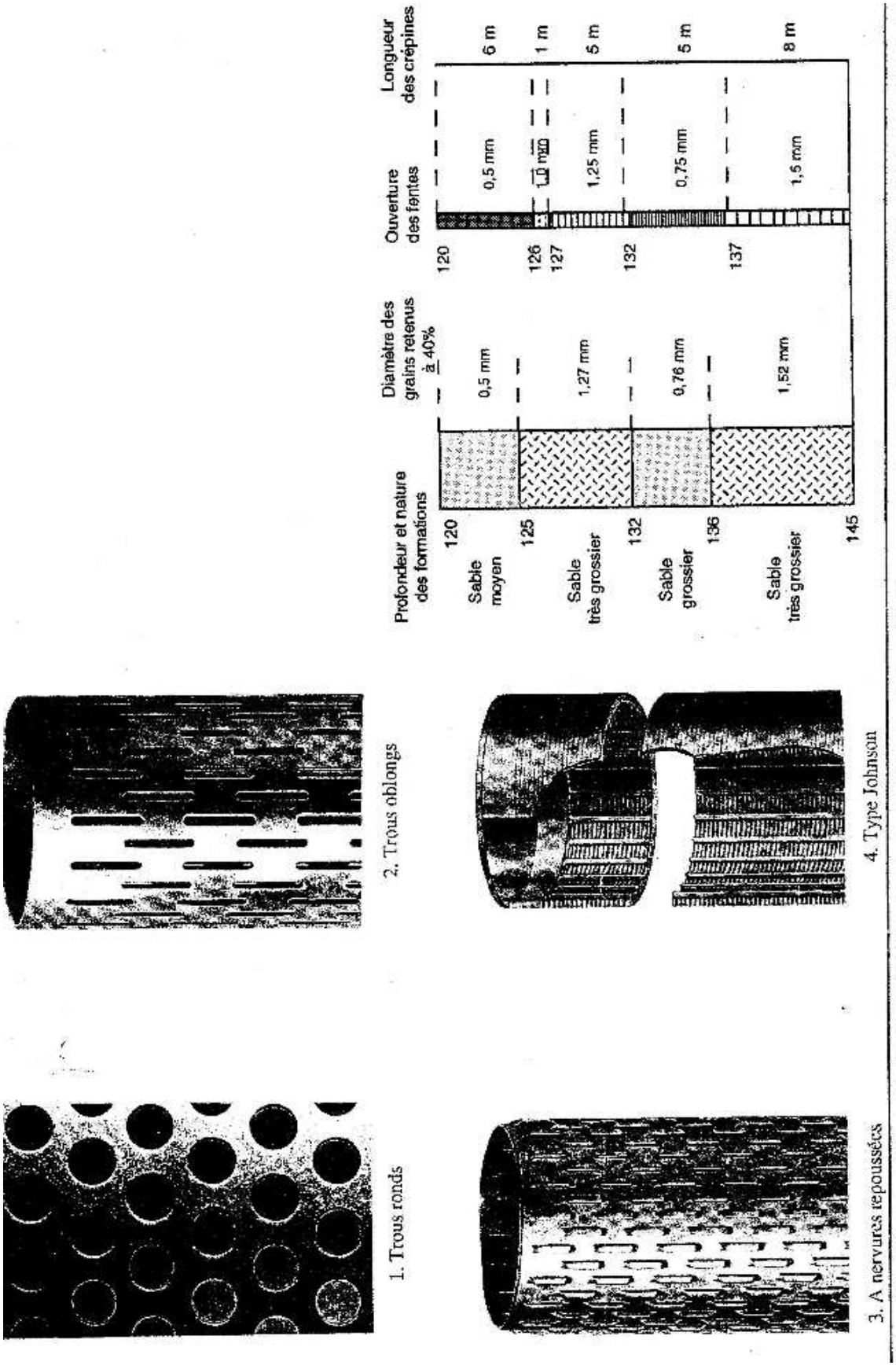


Fig. 1 : Les différents types de crépines - critères de choix des fentes en formation hétérogène

4. CIMENTATION

4.1. OBJECTIFS

La cimentation est l'opération qui consiste à mettre en place par simple déplacement, du laitier de ciment derrière une colonne de tubage, en une ou plusieurs fois (Fig. - page 7 bis). La cimentation du tubage est destinée à atteindre les objectifs suivants :

- ancrer les tubages dans le terrain ou les tubes provisoires,
- empêcher toute migration de fluide d'une formation dans une autre et surtout celles productrices qui constituent l'objectif de ce forage,
- rendre l'espace annulaire étanche et empêcher la pollution par les eaux de surface,
- protéger le tubage de l'action corrosive de certains fluides ou terrain.

Pour atteindre ces objectifs, la "gaine de ciment" mise en place entre le terrain et le tubage doit être : continue, homogène, imperméable et adhérente aux parois du forage et au tubage.

4.2. MÉTHODE DE RÉALISATION

Devant l'importance d'une bonne cimentation pour l'exploitation des eaux minérales, mais d'une manière plus générale pour toute action de forage, l'utilisation de moyens rudimentaires (bac ouvert, pelle manuelle pour le malaxage), l'absence de moyens de contrôle de volume, de densité sur place est à proscrire.

Les méthodes de cimentation les plus courantes sont :

- la cimentation hors de la colonne de tubage. Le pied de tube est ancré dans le terrain ou obturé. Un tube de petit diamètre est mise en place jusqu'au fond du trou dans l'espace annulaire. Le tube d'injection est retiré en fin de cimentation. Cette méthode est à réservée aux cimentations peu profondes de l'ordre de 50 m.
- la cimentation par l'intérieur du tubage à sceller (cimentation sous pression). Le pied de tube est équipé d'un sabot destructible qui permet le passage du ciment mais empêche la remontée des fluides dans le tubage. La cimentation est terminée lorsque le coulis de ciment réapparaît en surface dans l'espace annulaire avec la qualité de celui injecté.
- La cimentation au moyen d'un bouchon libre.
- La cimentation au moyen d'un bouchon libre (cimentation sous pression). Le bouchon peut être en plastique ou tout autre matière inerte, légère et destructible. Il a pour objet de séparer les deux phases d'injection (Fig. 3 - page 7 ter).

D'autres méthodes de cimentation ne sont utilisées qu'en forage type pétrolier.

Le choix de la méthode est lié principalement à la profondeur de la cimentation, l'état des parois du forage qui peuvent être régulières ou non. Dans la mesure du possible, on préférera les cimentations sous pression.

4.3. CHOIX DU CIMENT

Le succès d'une cimentation dépend bien sûr :

- de la préparation du trou,
- du mixage et du pompage du laitier,
- du déplacement du ciment,
- du temps de prise.
- mais aussi du choix du ciment et des éventuels additifs en fonction de l'environnement dans lequel il va être mis en place : température et pression dans l'ouvrage, qualité des roches encaissantes, qualité des fluides souterrains, qualité de l'eau avec laquelle sera réalisée le laitier, mais aussi matériau de tubage.

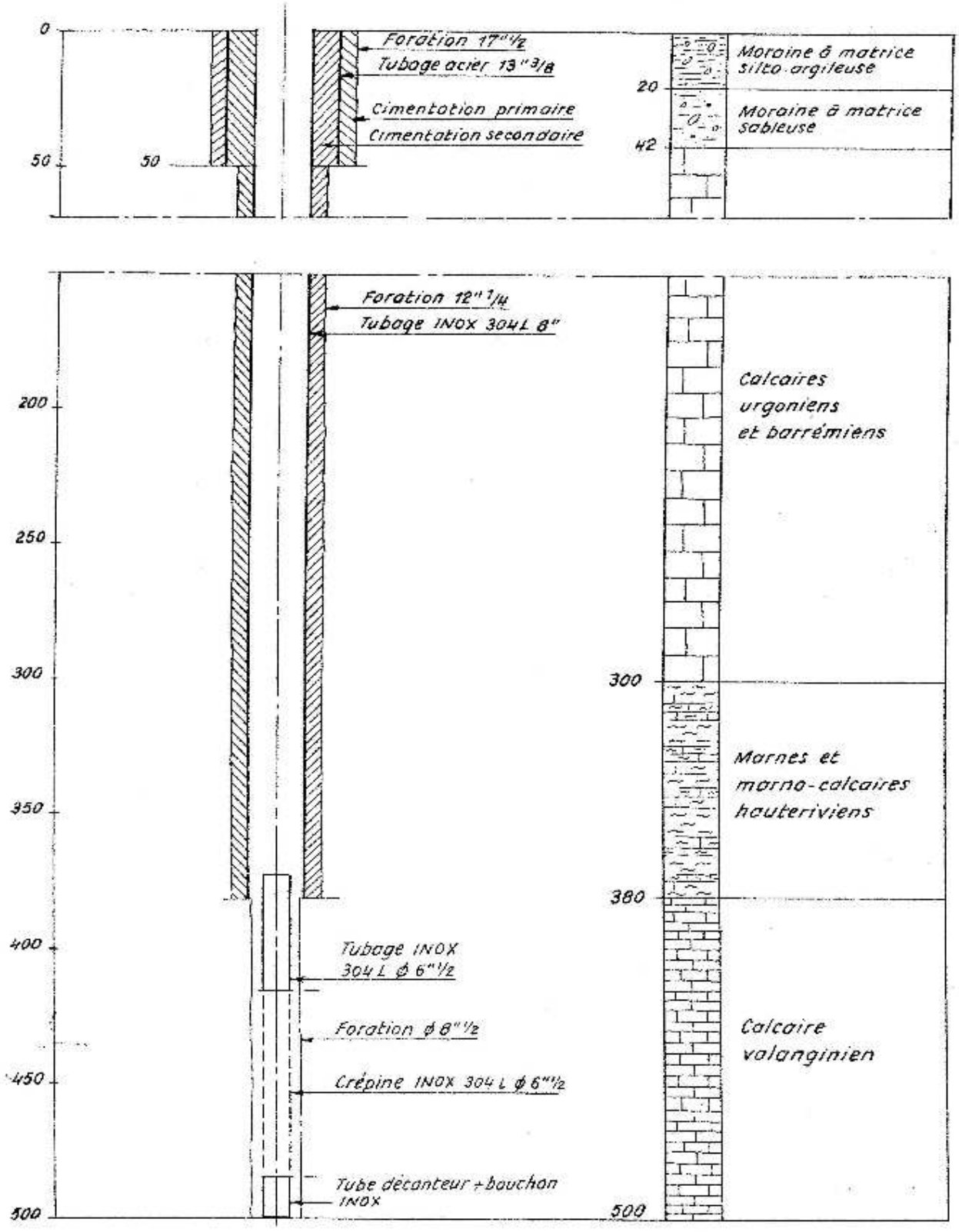
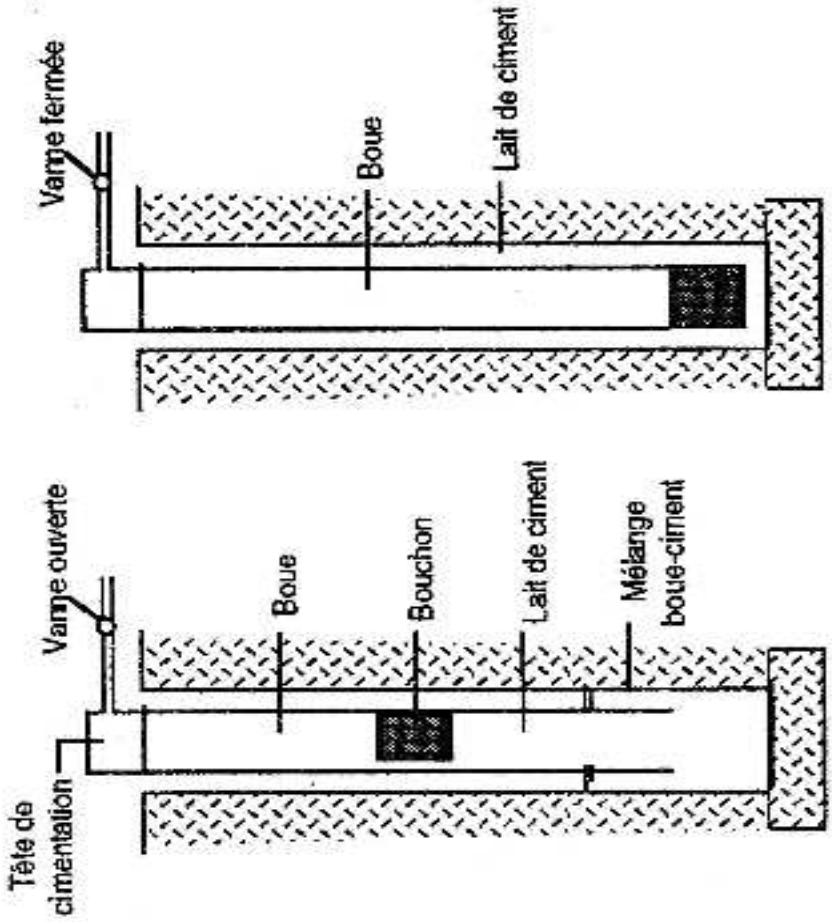


Fig. 2 : Exemple équipement en ouvrage d'exploitation avec protection en tête



Envoi d'un bouchon après injection de lait de ciment.

Fig. 3 : Schéma descriptif théorique d'une cimentation sous pression (méthode du bouchon libre)

5. DÉVELOPPEMENT D'OUVRAGE

5.1. OBJECTIF

Le développement d'un forage consiste à améliorer la productivité de la formation aquifère située autour de la crépine et à stabiliser cette formation.

Cette opération s'effectue le plus souvent lorsque la colonne de captage est en place avant la mise en production du forage.

5.2. TYPE DE DÉVELOPPEMENT

Les types de développement les plus couramment utilisés sont :

- le développement à l'air lift ou émulseur (Fig. 4 - page 9 bis). Il s'agit de stimuler alternativement le forage par injection d'air filtré créant un phénomène, de flux et de reflux dans le réservoir.
- le développement par pistonnage,
- le développement par pompage alterné, et surpompage,
- les développements par fracturation hydraulique; Cette technique permet d'élargir les fractures existantes ou d'en créer de nouvelles et de les maintenir ouvertes par des agents de soutènement. Cette méthode est particulièrement adaptée aux réservoirs consolidés fissurés.
- le développement par adjonction de produit chimique, le plus fréquent étant l'acide chlorhydrique utilisé dans les terrains carbonatés. Il est utilisé des polyphosphates pour des réservoirs à tendance argileuse, ou d'autres types d'acide et mélange au cas par cas : acide sulfamique, acide fluorhydrique...Cette méthode nécessite le traitement des effluents avant rejet des eaux d'exhaure dans l'environnement.

5.3. CHOIX DE LA MÉTHODE DE DÉVELOPPEMENT

On ne peut pas parler d'une méthode unique pour un type de forage et une combinaison de techniques peut être nécessaire. Il n'y a pas de règle générale, le choix est plus guidé par l'expertise technique, l'expérience acquise sur l'aquifère, le suivi du forage et les objectifs fixés de réussite de l'ouvrage.

Une méthode de développement non maîtrisée ou utilisée dans un contexte qui ne convient pas, peut se révéler dommageable pour l'ouvrage et éventuellement pour la ressource. Par exemple, le surpompage peut créer une compaction des sédiments fins entraînant une

réduction de la perméabilité ; une acidification mal menée peut aboutir à la formation de gel sur les crépines ; et certaines fracturations peuvent créer des communications inopportunes.

5.4. PRÉCAUTIONS A PRENDRE DANS LE CADRE D'UN FORAGE D'EAU MINÉRALE

Plus que pour un forage classique on devra veiller à ce que les opérations de développement :

- ne modifient pas de façon durable, la qualité physico chimique du fluide (qualité des inhibiteurs d'acide par exemple) exploité,
- ne réagissent pas avec la colonne de captage.

5.5. CONTRÔLE AU MOMENT DE LA RÉALISATION

Il consiste à vérifier que la ou les méthode(s) de développement mise(s) en oeuvre se déroulent suivant les règles de l'art tant au niveau de la qualité qu'à celui de la sécurité du personnel et de l'environnement en particulier pour les développements chimiques.

Dans le cas de la présence d'un massif de gravier, on doit s'assurer que son niveau supérieur ne libère pas une partie des crépines sous l'effet du développement qui tasse généralement le massif.

En fin de développement, on contrôlera que la teneur en fine soit inférieure à celle prévue au cahier des charges.

Les opérations de complétion devront s'arrêter lorsque la capacité spécifique de l'ouvrage n'augmentera pas de façon significative après la dernière technique mise en oeuvre.

5.6. CONTRÔLE A POSTERIORI

Le contrôle de l'ouvrage d'un point de vue hydraulique peut révéler un développement insuffisant, ou simplement une opération à renouveler régulièrement.

6. NETTOYAGE ET DÉSINFECTION

Dans le cadre d'un forage d'eau minérale pour lequel la ressource ne peut être traitée avant distribution, la plus grande attention sera prise pour éviter toute rétropollution par la surface. Cela passe par un nettoyage et une désinfection du matériel et des matériaux introduits dans l'ouvrage à demeure ou en provisoire et des mesures d'hygiène renforcées de la part des intervenants sur site.

6.1. PRODUIT MIS EN ŒUVRE

Ils doivent présenter une compatibilité alimentaire sans rémanence d'action à long terme. Leur sélection tiendra compte de la physico-chimie des eaux. On notera les effets souvent dévastateurs des tentatives de stérilisation massive par "eau de javel" sur les matériaux.

6.2. PRÉCAUTION D'EMPLOI

S'agissant généralement de produits dangereux et amenés concentrés sur sites, les opérations de dilution, d'injection et de gestion des rejets nécessitent des précautions d'usage (communication des fiches produits, procédures préalables, matériel et vêtements de sécurité).

6.3. CONTRÔLE AVANT ET APRÈS L'EMPLOI DU PRODUIT

Ces contrôles doivent comporter des mesures terrains de concentration des produits, ainsi que des prélèvements et mesures sur l'eau minérale (physico-chimique et bactériologique).

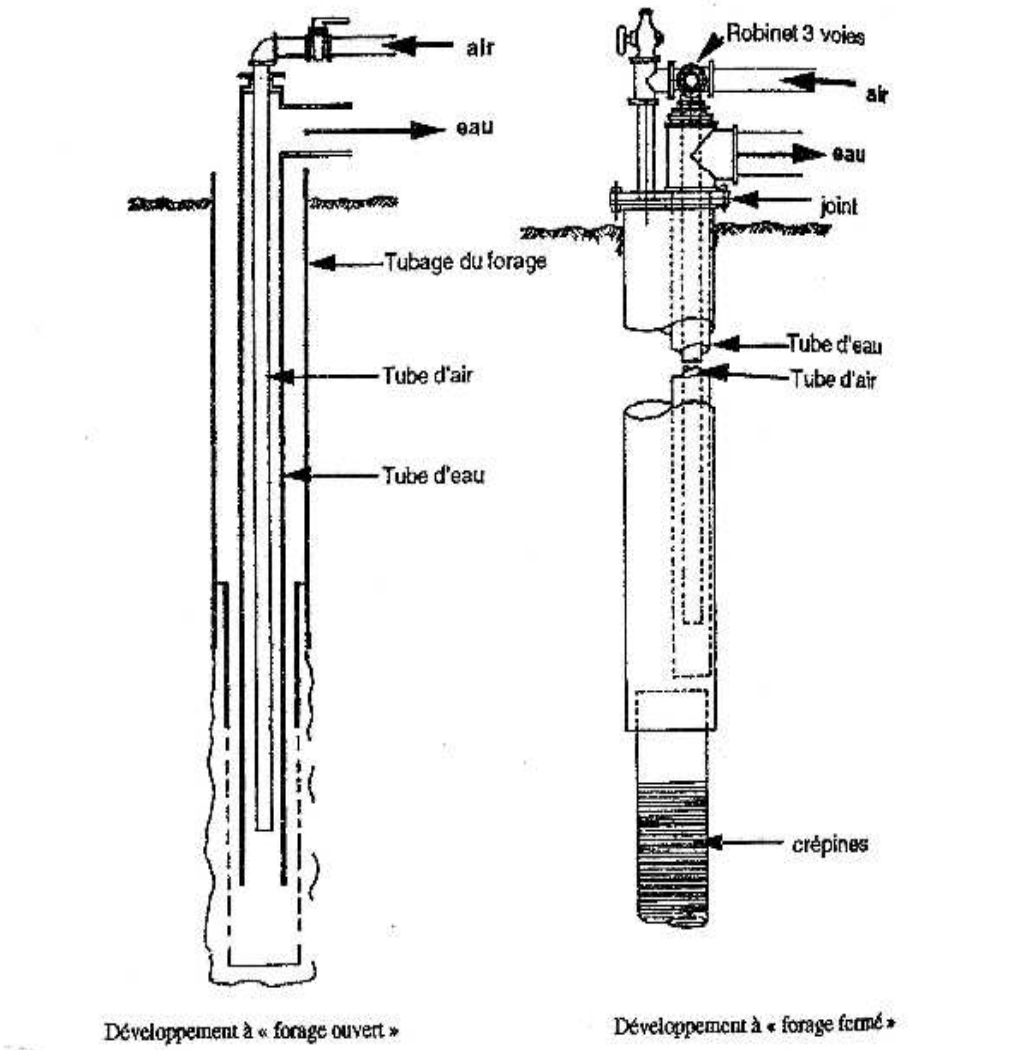


Fig. 4 : Développement à l'émulseur - schéma de principe de mise en service

7. CONTRÔLES DE RÉCEPTION - DOSSIER DES OUVRAGES EXECUTES

Ces contrôles, essentiels, reprennent pour partie l'ensemble des contrôles à posteriori développés durant les paragraphes consacrés aux différentes phases de travaux, dont :

- la vérification de la profondeur du forage,
- un contrôle de la verticalité de l'ouvrage,
- une inspection vidéo de l'ouvrage, qui servira aussi "d'état zéro" dans la vie de l'ouvrage,
- des contrôles éventuellement par diagraphies spécifiques (contrôle de cimentation),

- un test de pompage pour vérifier la teneur en fine de l'eau d'exhaure, pour permettre de réaliser une analyse physico-chimique de réception et une analyse bactériologique adapté au fluide prélevé.

L'entreprise fournira un dossier des ouvrages exécutés de l'ouvrage qui comprendra :

- la localisation du point,
- les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et techniques synthétisés sur une coupe,
- la copie du cahier de chantier avec le relevé des opérations et des matériaux mis en oeuvre au jour le jour,
- les certificats d'origine des matériaux et matériels employés,
- une notice d'emploi et d'entretien pour les matériels mis en place.

Les cuttings clairement repérés et identifiés seront remis au maître d'ouvrage.

Le forage dans l'attente d'un équipement de production sera équipé d'un capot de protection. Celui-ci peut être étanche ou avec gestion de qualité bactérienne de l'air (filtre). Cette période inerte de l'ouvrage doit être limitée au strict minimum pour permettre un renouvellement de la colonne d'eau.

8. ÉQUIPEMENT D'EXHAURE DANS LE FORAGE

Il n'est pas question d'aborder l'ensemble des équipements d'une station de pompage mais seulement quelques aspects directement liés à l'ouvrage comme :

- la compatibilité avec le fluide et les matériels introduits dans le forage (pompe, colonne d'exhaure, sonde de niveau, alarme niveau haut niveau bas, câble électrique, câble de soutien de la pompe ...).
- les caractéristiques et la position de la pompe immergée dans la colonne de captage qui doit répondre aux caractéristiques géométriques hydrauliques mais aussi hydrochimiques de cet ouvrage.

Les équipements d'anti retour et disconnexion qui sont la seule garantie de protection contre la rétropollution des ressources.

Les précautions de mise en oeuvre de tous ces matériels (nettoyage, stérilisation, travaux en environnement propre).

Les spécifications de la tête de puits, pièce d'interface ressource / atmosphère qui cumule les fonctions de fermeture de l'ouvrage, suspension des équipements de refoulement et de gestion de l'annulaire du forage.

C'est aussi l'interface entre le point d'émergence et les équipements de l'exploitation de surface qui doivent aussi faire l'objet du même souci de qualité.

9. CONCLUSION

Plus qu'une spécificité liée aux eaux minérales en tant que fluide, c'est une maîtrise irréprochable de la qualité de la conception et réalisation de ces ouvrages qui est demandée.
La réalisation du forage comme des équipements d'exploitation en surface doit permettre de garantir et de gérer dans le temps la qualité des eaux minérales.

BIBLIOGRAPHIE

PRATIQUE DU FORAGE D'EAU - R. LAUGA - EDITION SEESAM (1990).
FORMULAIRE DU FOREUR - EDITION TECHNIP (1978).
LE FORAGE D'EAU - A. MABILLOT - EDITION JOHNSON FILTRATION SYSTEM (1988).

SUPPORT DE COURS ANTEA : LES TECHNIQUES DU FORAGE D'EAU (1994) - E. BERTHET.

LES EAUX MINERALES ET LES MATERIAUX EN CONTACT (1990) - G. POPOFF - JL. HONEGGER, JOURNAL HYDROGEOLOGIE 1990 N°4.

MATERIAUX AU CONTACT DES DONNEES ALIMENTAIRES - PRODUITS DE NETTOYAGE DE CES MATERIAUX (1994) - JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE FRANÇAISE.

EFFET DES MATERIAUX SUR LA QUALITE DES EAUX DESTINEES A LA CONSOMMATION HUMAINE : INFLUENCE DE LA NORMALISATION EUROPEENNE ET DE LA RECHERCHE PRENORMATIVE SUR LA REGLEMENTATION NATIONALE ET EUROPEENNE (1994) - JL. GODET - S. RIGAL - P. LEROY - JOURNAL AGHTM N° 10 OCTOBRE 94.

LE FORAGE D'EAU (1993)- MICHEL DETAY - ED MASSON.

LA PRATIQUE DU FORAGE D'EAU (1990) - ROBERT LAUGAT - ED SEESAM.

DIAGRAPHIES APPLIQUEES A L'HYDROGEOLOGIE (1987) - DOMINIQUE CHAPELLIER – ED LAVOIRSIER TEC/DOC.

HYDROCHIMIE EN FORAGE - APPROCHE METHODOLOGIQUE (1995) - ALAIN GADALIA - JEAN LUC HONEGGER - JOURNAL HYDROGEOLOGIE BRGM.95.