

CHAPITRE 3 : EQUIPEMENT DE FORAGE

1. Introduction
2. Le tube plein
3. La crépine
4. Le massif filtrant (gravier additionnel)
5. La cimentation

1. INTRODUCTION

Trois éléments essentiels constituent l'équipement de forage d'exploitation peuvent définir la qualité de l'ouvrage (son optimisation et sa longévité):

- ✓ Le tube plein.
- ✓ La crépine ou le tube perforé.
- ✓ Le massif filtrant.

II. TUBAGE

Il peut être de l'acier ou en PVC, on distingue plusieurs types de tubes mise en place pendant l'exécution d'un forage:

- Tube guide ou cuvelage : peut être défini comme le tube qui isole tout le puits des terrains encaissants et qui durant les opérations contient le fluide de forage.
- Tubages intermédiaires : c'est un tubage installé à l'intérieur du tubage du tube guide (tubage de surface) et dans lequel les opérations de forage s'effectuent à travers ce tubage intermédiaire.
- Tubage de production : appelé aussi tube plein. Ce tubage est cimenté dans l'encaissant (terrains imperméables), du moins dans la partie basse du forage si un tubage intermédiaire est utilisé.

II.1. Le choix de tubes pleins : Ils doivent être conçus pour résister mécaniquement aux pressions qui lui seront appliquées une fois mis en place dans le forage (efforts de traction, efforts d'écrasement, efforts d'éclatement et efforts de flambage). Son diamètre est plutôt fonction du débit d'exploitation (Tab.01). Sa longueur est en fonction de la nature lithologique des formations traversées. La nature des tubages sera en fonction de la qualité des eaux captées.

N.B) D'autres paramètres peuvent intervenir dans le choix des équipements, tel que:
le délai d'approvisionnement ou le coût.

a) Type des matériaux du tubage plein:

Il existe deux matériaux principaux de tubage plein :

- PVC (plastique)
- Acier, avec notamment :
 - Acier noir
 - Acier noir galvanisé
 - Acier revêtu d'un film plastique
 - Acier au chrome aluminium
 - Acier inoxydable

b) Les caractéristiques des tubages les plus courants sont les suivantes :

- ✓ Longueur des éléments : 3 à 6m.
- ✓ Epaisseur : 2 à 11mm (acier), 4 à 16 mm (PVC).
- ✓ Diamètre : 100 à 2500 mm (acier), 60 à 315 mm (PVC).
- ✓ Raccordement : manchon soudé, embouts filetés (acier), filetage (PVC).

c) Mise en place du tubage : Pendant l'opération de forage les risques d'effondrement pouvant être importants, le tubage est mis en place le plus rapidement possible. Le trou de forage ne doit pas rester longtemps sans protection au risque de perdre le forage (effondrement du trou). Le plan de tubage (longueur et position des tubes pleins et des tubes crépinés) est établi en fonction de la coupe géologique du forage ou sont notées les différentes "couches" de terrain et les venues d'eau.

Avant d'effectuer l'opération de la mise en place de tubages pleins, ils ya quelques règles de base doivent être respectées :

- ✓ Prévoir de laisser au moins un pouce (25.4 mm) de jeu entre la pompe et diamètre intérieure du tubage. Celui-ci sera donc 5 cm environ plus grande que diamètre intérieure de la pompe.

- ✓ Prévoir de laisser du jeu entre les parois nues du trou et le tubage plein, notamment en prévision de cimentation de l'espace annulaire.

- ✓ Le tubage ne descend pas toujours jusqu'au fond du forage (dépôts des déblais en suspension dans la boue lors de l'arrêt de la circulation ou parfois effondrement), il faut donc en tenir compte en réduisant la longueur du tubage de 0.5 à 1 mètres par rapport à la profondeur réelle forée.

- ✓ Le dernier tube doit dépasser d'environ 0.5 mètres au dessus de la surface du sol.

Les longueurs de tube pouvant varier avec le filetage, il est conseillé de mesurer chaque longueur de tube pour établir un plan précis avec un captage correcte de l'aquifère.

- ✓ Le tubage doit descendre librement sous son propre poids dans le trou. Si le forage n'est pas vertical (fréquent au delà de 20 mètres), il est fréquent que les frottements le long dutube bloquent la mise en place du tubage. Ceci peut être résolu en appuyant légèrement sur le tubage pour qu'il descende. Dans le cas contraire, il faut le remonter et réaléser le trou.

- ✓ Une méthode alternative consiste à descendre le tube sans bouchon de fond pour qu'il puisse ripper le long des parois. Il sera recommandé de boucher le fond du forage en faisant descendre du ciment depuis la surface.

N.B) a fin de préciser la zone productive, les opérations de diagraphies seront vivement souhaité (résistivité électrique, gamma ray, neutron) .

III. LA CREPINE

La crépine est un tubage perforé et qui permet la pénétration de l'eau de l'aquifère. Placée en face d'une partie ou à la totalité de la formation aquifère, elle constitue l'équipement principal de forage hydraulique. Cet équipement doit:

- *Assuré la production maximale d'eau claire sans sable.
- *Résister à la corrosion due à des eaux agressives.
- *Résister à la pression d'écrasement exercée par la formation aquifère en cours d'exploitation.
- *Assuré une longévité pour l'ouvrage.
- *Réduire les pertes de charge.

Les caractéristiques géométriques de la crépine (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, digraphie, ...).

Tableau 4 : Choix des ouvertures des crépines en fonction de la granulométrie de l'aquifère

Taille des grains de l'aquifère	Taille des grains du gravier filtre	Taille des orifices de la crépine
0,1 à 0,6 mm	0,7 à 1,2 mm	0,50 mm
0,2 à 0,8 mm	0,1 à 0,5 mm	0,75 mm
0,3 à 1,2 mm	1,5 à 2,0 mm	1,00 mm
0,4 à 2,0 mm	1,7 à 2,5 mm	1,50 mm
0,5 à 3,0 mm	3,0 à 4,0 mm	2,00 mm

➤ Le choix de la crépine est déterminé suivant:

- la profondeur de l'aquifère: Pour les aquifères profond on doit procurer l'utilisation des crépines en acier, par contre pour des aquifères de faible profondeurs en procure l'utilisation des crépines en PVC.

- l'Epaisseur de type de terrain (roche consolidée ou roche friable: Exemple si l'aquifère a une épaisseur moins de 100m et de formation dure (avoir une perméabilité de fissure) en préfère de ne pas installé des crépines, par contre si l'aquifère à une épaisseur plus de 100m et de formation friable on doit doter notre forage par une crépine longue (voir tableau)

- la granulométrie des sables du niveau aquifère capté :Le diamètre des ouverture seront déterminé en fonction de la taille des grains de sable.

- la qualité de l'eau de l'aquifère: ce genre de situation impose d'utiliser des crépines qui résistent à la corrosion et à l'incrustation.

➤ . Les crépines en acier (Fig.01): Il existe des crépines de types:

a) Crépines à trous ronds : Elles sont utilisées pour les terrains durs où leur densité de perforation est de 10%.

b) Crépines à trous oblongs: caractérisée par des ouvertures rectangulaires verticales et une densité de perforation qui varie de 10% à 20%. Ce type de crépine a une longueur standard 3m.

c) . Crépines à prussiennes: Caractérisée par un faible pourcentage de perforation rectangulaires horizontales, formant souvent de bonne résistance mécanique.

d) Crépines à nervures repoussées: Réalisée à plat puis roulée et soudée cela lui confère de bonne résistance mécanique. Le pourcentage de vide varie de 3 à 27%.

Tableau 1 : Choix des crépines et des massifs filtrants pour diverses conditions

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

e) Crépines à fentes continues (type Johnson): Obtenue par enroulement en hélice soudé sur des génératrices métallique verticales. L'ouverture cette crépine est horizontale continue sur toute la longueur de la crépin. Elle est utilisée pour capter un aquifère sableux fin, et moyennement profond à profond.

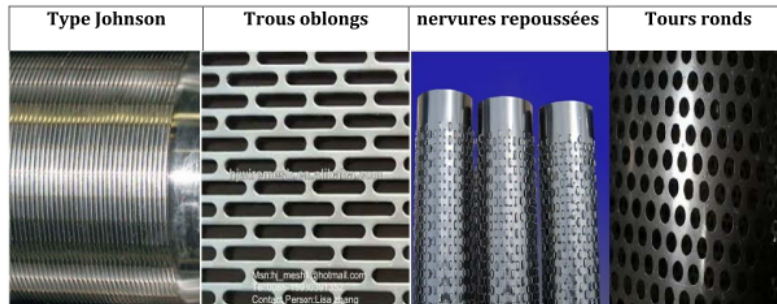


Fig.01: Les types des crépines en acier.

Pour assurer plus de performance pour ce genre de crépine, la société Johnson a mis au point un kit complet d'équipement de captage, nommé "MUNIPAK"(Fig.). Il s'agit de doubles crépines à fil enroulé, emboîtées l'une dans l'autre, et remplie de massif filtrant (filtre est composé de billes libres de céramiques, sphériques et lisses).



Fig. : la crépine MUNIPAK de Johnson.

- . Les crépines de forage en PVC : Dispose d'ouverture perpendiculaire à l'axe du tube. Cette disposition offre un écoulement optimum à travers ces orifices. Plusieurs largeurs d'ouvertures sont disponibles sur le marché (0.5-0.6, 0.75-0.8 et 1 mm).

On trouve sur le marché deux catégories des Tubes et crépines en PVC:

1. Tubes et crépines à paroi normale : Destinés pour des puits de faibles et moyens profondeurs.
2. Tubes et crépines à paroi épaisse (ou renforcée):Destiné pour les forages profonds.

Ce types de crépine et tubes sont faciles de les transportés et cela vue de leurs faibles poids .Elle résistent parfaitement aux attaques chimiques des eaux souterraines et aux acides qui sont généralement utilisés durant le développement des forages ou pour leurs entretien. Pour cela ces caractéristiques assurent une longévité à cet équipement. L'utilisation des crépines et des tubes en

PVC dans les forages profonds (plus de 500m) est déconseillée et cela due à leurs faibles résistances mécaniques, et au condition extrêmes de pression et température que caractérise ces profondeurs.

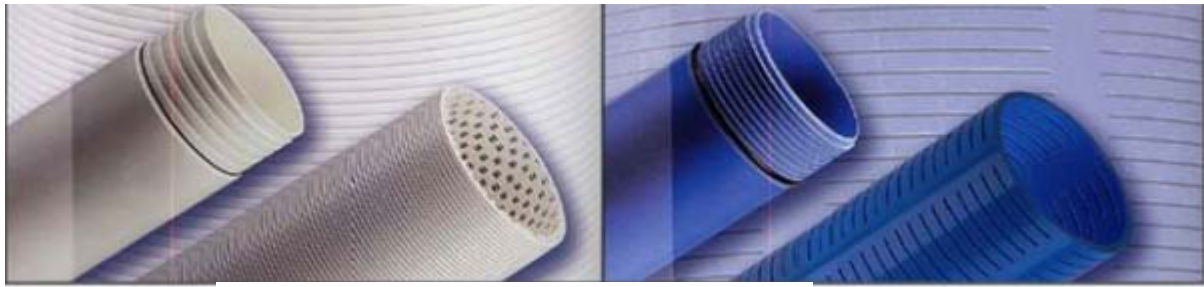


Fig.03: Les types des crépines en PVC.

- ❖ Longueur et position des crépines : La longueur et la position de crépine dépendra de la pression de l'eau dans la nappe, la nature et la granulométrie du terrain. Quatre cas peuvent se présenter :

- Nappe artésienne en terrain homogène (non stratifié): On crépinera 70% à 80% de l'épaisseur aquifère, on commençant toujours de la base de formation (Fig.). Si la couche aquifère est très épaisse, il est recommandé (par raison d'économie et résistance mécanique), de fractionner la crépine en tronçons d'égale longueurs, séparés par des morceaux de tube plein de même diamètre.

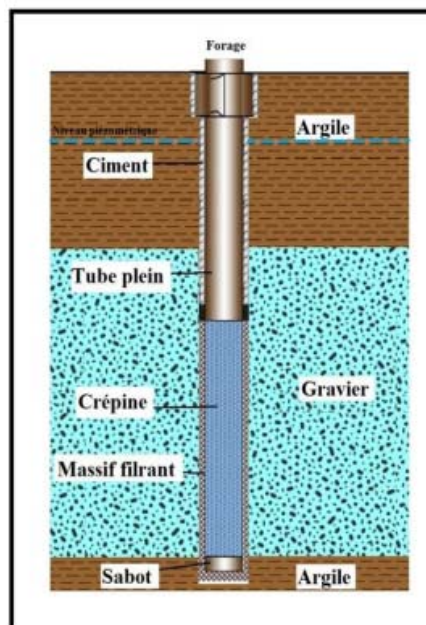


Figure 50: Crépilage en terrain homogène dans une nappe artésienne

➤ Nappe artésienne en terrain hétérogène (stratifié): On crépinera à 70% à 80% la couche la plus perméable.

On détermine la couche la plus perméable par l'un des méthodes suivantes : examen visuel des déblais ou par diagraphie (gamma ray , polarisation spontanée, ect...)

➤ Nappe libre en terrain homogène: Pour une nappe ayant une épaisseur inférieure à 45m, on crépinera seulement le tiers inférieur ou la moitié de son épaisseur, par contre si l'épaisseur plus grande, on peut crépiner jusqu'à 80% de son épaisseur pour obtenir une capacité spécifique plus importante.

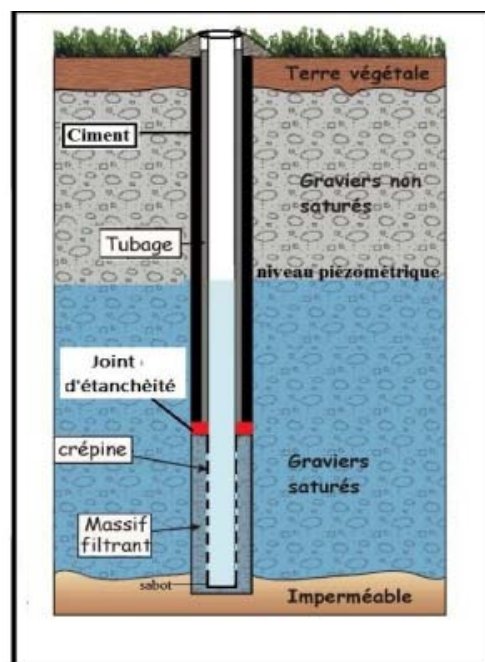


Figure 51: Cas de crépinage en terrain homogène dans une nappe libre.

➤ Nappe libre en terrain hétérogène (couche multiples) : on crépinera la couche la plus perméables (70% à 80%). Si cette couche est mince on doit crépiner les autres couches les moins perméables, mais avec des ouvertures différentes.

Quatre cas peuvent se présenter :

a- Sables fins surmontant une épaisse couche de gros sable ou gravier : on crépinera seulement 70% à 80% de sable grossier (ou gravier).

b- Forte couche de sable fin surmontant une mince couche de gros sable ou de gravier : crépiner toute la couche grossier et environ la moitié de la couche de sable fin mais avec des ouvertures différentes.

c- Sable grossier surmontant une couche d'égale épaisseur de sable fin : on crépinera toute la couche de sable fin et la moitié au moins de la sable grossier, avec des ouvertures différents.

d- Sable fin, en sandwich entre deux couches de matériaux grossier : on crépinera les deux couches inférieures et le tiers ou la moitié de la couche supérieure, avec des ouvertures différents.

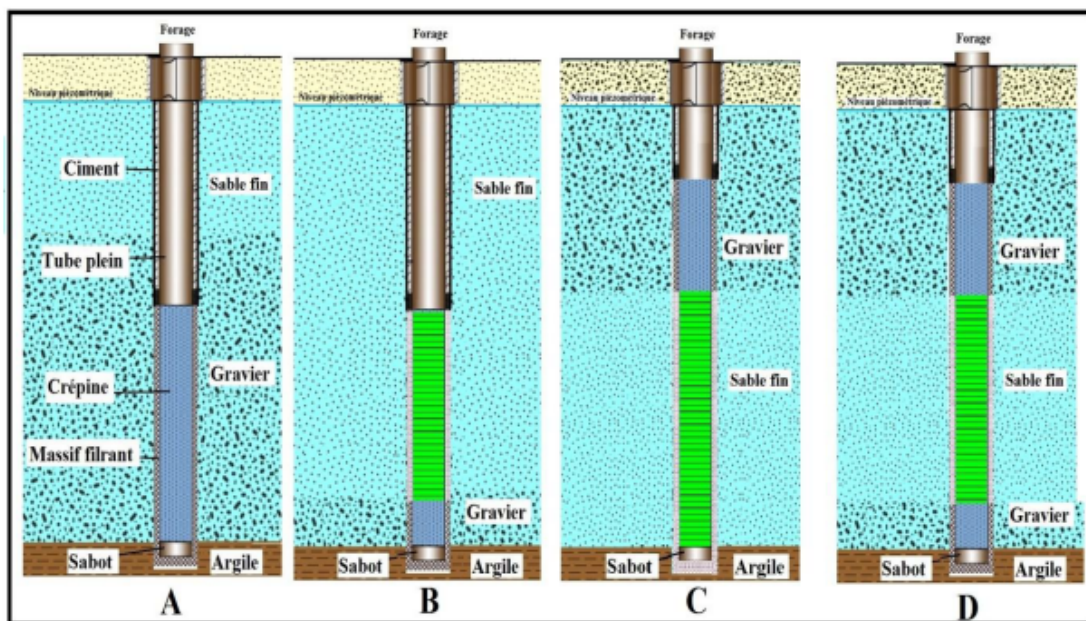


Figure 52: Quatre cas de crépinage en terrain hétérogène dans une nappe libre.

➤ Ouverture (slot) des crépines:

Le diamètre des ouvertures des crépines sont déterminer en fonction de la granulométrie de l'aquifère en question:

❖ Captage de l'aquifère de sable fin sans massif filtrant: Le massif de gravier est nécessaire lorsque la courbe granulométrique présente 2 caractéristiques ($d_{10} < 0,25\text{mm}$ et $1 < C_u < 5$). Si on capte l'aquifère sans massif de gravier la dimension des ouvertures de crépine est définie par l'analyse des courbes granulométriques des terrains pendant le forage de reconnaissance.

a-dans une formation homogène composée de sable fin uniforme, l'ouverture (diamètre) de la crépine doit retienne 40 % des sables. L'ouverture de la crépine correspond au diamètre des grains (donnée par la valeur de l'abscisse) qui représente 40% de l'échantillon analysée.

b-dans une formation hétérogène stratifiée (plusieurs couches) : l'ouverture des crépine dépendra toujours de la granulométrie , mais aussi la disposition des couches. La crépine retienne, pendent le développement 40% à 50% des terrains. Cette disposition des couches imposera deux modes de crépinage :

*Si les matériaux fins se situés au-dessus des gros, il convient de prolonger d'au moins 60cm vers le bas des matériaux fins (Fig.53).

*Si les matériaux fins se situés au-dessous des gros, l'ouverture choisir pour les éléments grossiers, ne doit pas être supérieure au double de celle adaptée aux matériaux fins (s'il ya lieu on intercale entre les deux morceaux un tronçon intermédiaire de coté de matériaux gros).

❖ Captage de formations compactes : la mise en place de la crépine dans les aquifères fissurés est rare pour éviter les problèmes de colmatage par les oxydations métalliques (fer, manganèse). S'il ya lieu en utilise des crépines avec un coefficient d'ouverture élevés pour ne pas affaiblir l'écoulement de l'eau vers l'ouvrage. La crépine dans les formation compacte et trop fracturée joue beaucoup le rôle de stabilisateur que filtre.

❖ Captage de l'aquifère de formation meuble et avec massif filtrant: Le massif de gravier est nécessaire lorsque la courbe granulométrique présente 2 caractéristiques ($d_{10} < 0,25\text{mm}$ et $1 < C_u < 5$). Les dimensions des ouvertures des crépines égale généralement $e = D_{90}$.

III.VI Pose de crépine: Au moment de la mise en place de la crépine, Il faut

- ✓ Que le matériel approvisionné corresponde bien aux spécifications choisies et calculées et ne soit pas endommagé au cours des transports et stockages
- ✓ Que les cotes prévues de pied et de tête de crépine soient respectées,
- ✓ Que l'assemblage par collage, vissage ou soudage soit fait dans les règles de l'art (couple de rotation et technique de soudure appropriée)
- ✓ Que l'ensemble soit nettoyé (décapé et passivé pour les aciers inox) et désinfecté avant d'être mis en place.
- ✓ Que La crépine est placée face au niveau producteur.
- ✓ Que'elle doit être équipée de centreurs pour assurer une répartition correcte du massif filtrant. Elle ne doit pas être dénoyée.
- ✓ Que le pied de crépine est fixé sur un tube plein (sabot) et doit avoir le même diamètre que la crépine.
- ✓ Que la base doit être fermée par un « bouchon de fond ».
- ✓ Racler les parois du forage à l'aide d'outils aléurs (Fig.) ou les gratteurs (hérisson...)
- ✓ (Fig.54) travaillant au-dessous de la colonne de soutènement. Cette opération doit être rapide juste avant la mise en place de la crépine pour éviter l'éboulement de forage. On peut aussi traiter le cake, au moyen d'acide (fluorhydrique ou chlorhydrique 15%), ou par l'emploi de sels de soude (pyrophosphate, hexamétaphosphate.etc.). après l'élimination de cake, la pose de crépine sera facile et son fonctionnement plus efficace.

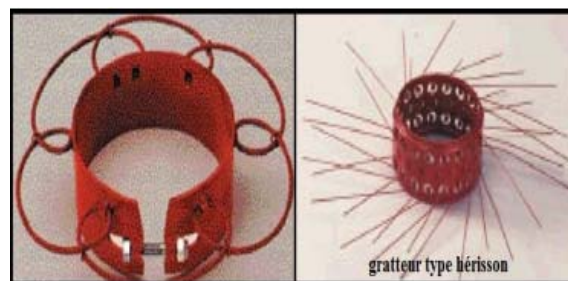


Figure : les gratteurs.

Méthode de mise en place de la crépine dans l'ouvrage de captage dans leur majorité sont de l'un des trois types suivants :

1) Ouvrage à équipement monolithique (1seul étage).Les crépines et le tubes plein ont le même diamètre. L'assemblage des tubes pleins et des crépines se fait soit alors par filetage, par soudage ou collage. puis sont alors descendues à l'intérieur de l'ouvrage .

2) Ouvrage télescopé : cette méthode consiste la descente des tubes pleins et la cimentation des parties supérieur non exploité, puis continue le forage jusqu'au mur de la couche aquifère, puis

descendre la crépine en face de la côte prescrite. Au sommet de la crépine on ajoute un tube plein, puis en ajout gravier additionnel dans l'espace qui sépare le tube cimenté et ce tube plein.

3) Ouvrage à colonne perdue crépine: Cette technique consiste à descendre la crépine et doit être suspendue par un cône de suspension . Ce dernier est un dispositif d'attache à baïonnette pour la mise en place de la crépine ou une éventuellement extraction de cette dernière. Ce cône est dispose de quatre fenêtres pour la mise en place du gravier additionnel dans l'espace annulaire.

➤ . LE MASSIF FILTRANT (GRAVIER ADDITIONNEL)

Pour empêcher réduire la quantité d'ensablement au niveau du puits et par conséquence conséquence de l'efficacité de puits, un matériel meuble formé d'élément calibré, formé de graviers en silice (massif filtrant).Ce dernier est disposé dans l'espace annulaire entre la crépine et les parois du forage. Le diamètre du massif filtrant est déterminé par l'analyse granulométrique des éléments constituant votre aquifère, car:

- ✓ Un massif filtrant de granulométrie surdimensionnée dans une formation sableuse fine, peut provoquer un ensablement de l'ouvrage.
- ✓ Par contre, un massif filtrant de granulométrie trop fine pourra réduire le débit d'écoulement dans le forage

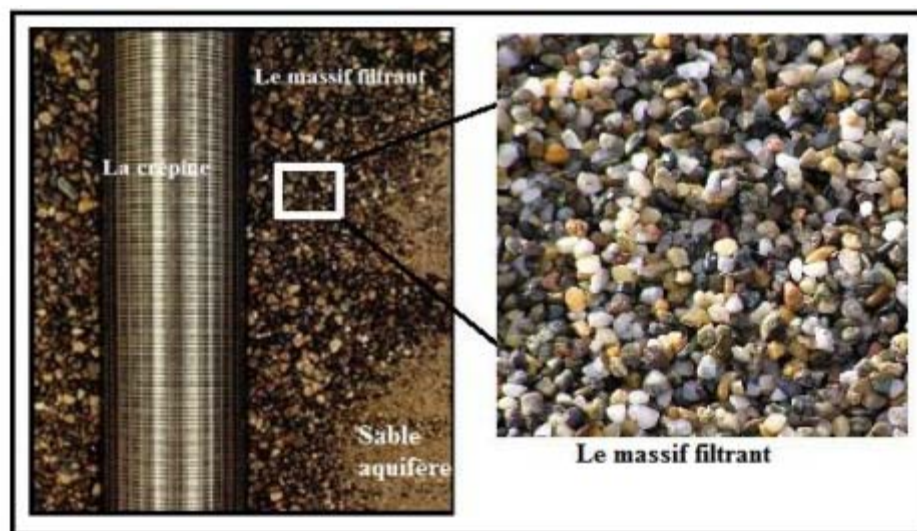


Figure 57: Emplacement du massif filtrant dans le forage.

Dans la pratique, le gravier additionnel est défini par la granulométrie de la formation et par l'ouverture de la crépine. Il doit être uniforme, propre, calibré et siliceux de préférence.

Le gravier descend dans l'espace annulaire le long du tubage. Une remontée de boue par le tube de forage indique une descente correcte du gravier. Lorsque le niveau du gravier atteint le haut des crépines, la boue ne remonte pas par le tube mais par l'espace annulaire : le massif de gravier doit alors dépasser le haut des crépines sur quelques mètres.

Le volume nécessaire du gravier peut être défini théoriquement (volume du trou moins volume de tubage) ou de la manière empirique suivante selon E.Drouart :

Volume de l'espace annulaire entre le diamètre du forage D et le diamètre de la colonne de tubage/crépine d (D et d étant tous les deux exprimés en pouces), longueur h (en mètres) est $V = 0.8h (D^2 - d^2)$ en litres.

➤ Diamètre du gravier additionnel :

Le diamètre du gravier additionnel dans des formations grossières et des terrains compacts, jouera le rôle de stabilisateur de formation et préviendra les éboulements ou les déformations de la colonne de captage. La granulométrie de gravier additionnel sera alors juste un peu plus forte que la moyenne de celle du terrain, et l'ouverture de la crépine ne change pas avec la mise en place de gravier filtrant.

Dans un aquifère à porosité de fissure où le terrain est compact, la mise en place d'un massif filtrant est déconseillé et cela pour éviter les problèmes de colmatage par les oxydations métalliques (fer, manganèse).

Le gravier additionnel est indispensable pour les aquifères lorsque la courbe granulométrique de formation aquifère présente deux caractéristiques: $d_{90} < 0,25\text{mm}$ et $1 < Cu < 5$. La courbe granulométrique du gravier de diamètre D sera comprise entre D0 et D100, elle est fonction de la courbe granulométrique de la formation aquifère. L'épaisseur du massif filtrant autour de la crépine sera comprise entre 50 et 130mm.

Calcule du diamètre du gravier additionnel par la méthode numérique:

✓ dans les formations multi-granulométriques : JOHNSON USA préconise :

$$D_{100} = 7d_{90} \quad CU = D_{100}/D_{10} = 2$$

Exemple d'application de la règle de JOHNSON USA :

$$d_{90} = 0,03\text{mm}$$

$$D_{100} = 7 \times 0,03 = 0,21\text{mm}$$

$$D_{10} = 2 \times 0,21 = 0,4\text{mm}$$

Soit un gravier filtre de 0,2 à 0,4 mm de diamètre.

La dimension d'ouvertures de crépine est liée à la granulométrie du gravier filtré :

$$e = D_{100} = 7d_{90} = 0,21\text{mm}$$

✓ dans les formations multi-granulométriques : JOHSON France :

D30 = 4d30 formations mono-granulométriques $Cu \geq 2,5$

D 30 = 6d30 formations hétérogènes avec $Cu \leq 2,5$

Calcule du diamètre du gravier additionnel par la méthode graphique : Dans le cas de l'exemple ci-dessous.

La formation est définie par la courbe de gauche : on multiplie la valeur de l'abscisse à 70 % par un nombre compris entre 4 et 6 si le matériau est très uniforme et par 6 dans le cas contraire. Si par exemple nous prenons 6 nous obtenons le point A, premier point de la courbe cherchée. Pour le deuxième point, nous faisons appel à la notion de coefficient d'uniformité U qui représente le quotient de l'abscisse à 40 % par l'abscisse à 90 %. L'expérience montre que U varie de 2 à 2,5 pour un gravier additionnel. Prenons 2,5 : Nous avons donc : le coefficient d'uniformité gravier additionnel $U = CF / BE = 2,5$.

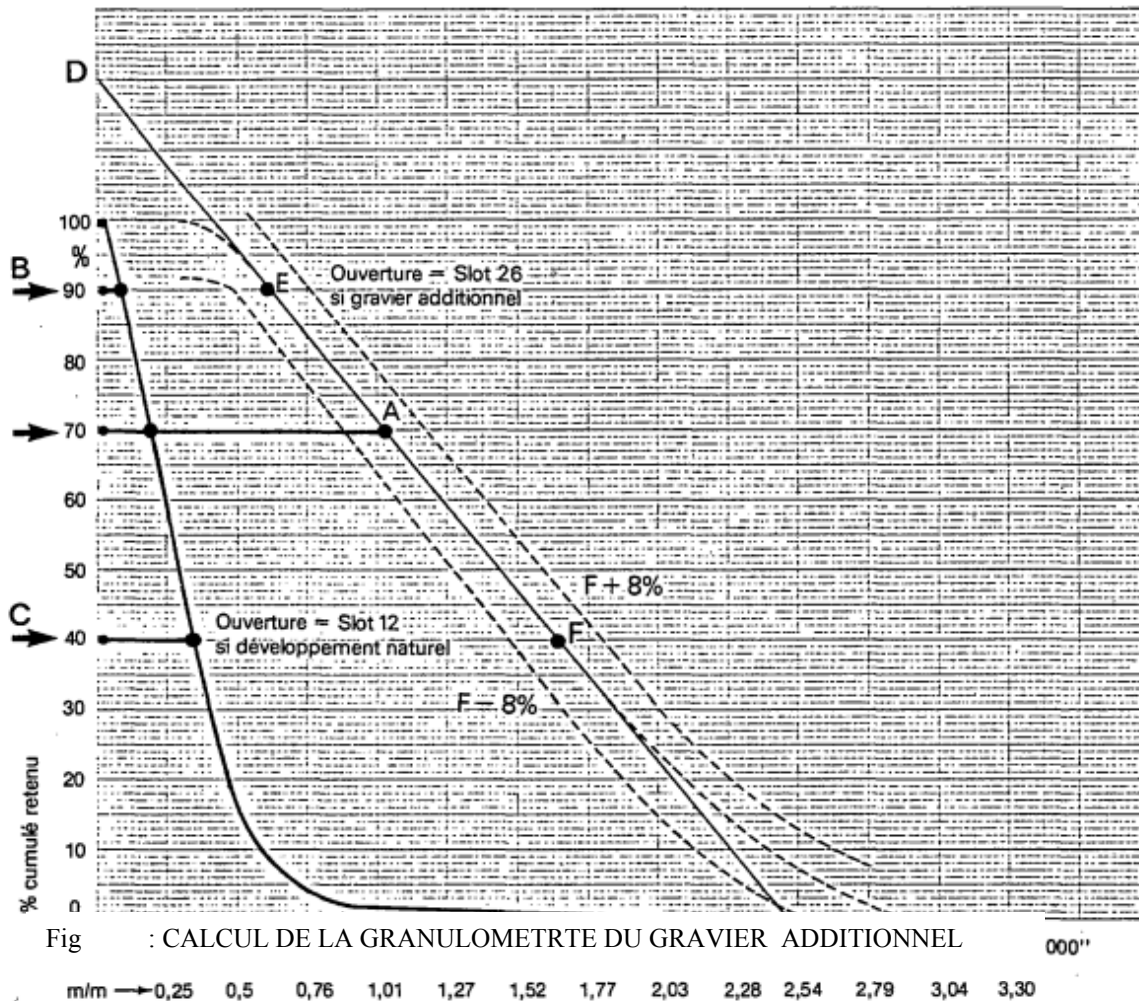
Pour trouver E et F, nous prolongeons l'axe des Y jusqu'au point défini comme suit :

$$BD = BC / (U-1) = BC / (2,5-1) = BC / 1,5$$

La droite DA que nous traçons, coupe les abscisses à 90 % et 40 % respectivement aux points E et F cherchés. Les points limitent le segment de droite EF passant par A, qui constitue la portion caractéristique de la courbe granulométrique du gravier additionnel (filtre) à utiliser.

$$F = 1.65 \text{ mm} \text{ et } E = 0.65 \text{ mm}$$

Nous interprétons ce tronçon de courbe comme suit : le gravier à utiliser doit être tel que 10 % de son poids soit constitué d'éléments plus fins que 0,65 mm environ (D90), et 40 % d'éléments plus gros que 1,65 mm environ (D 40),



➤ .CIMENTATION

La cimentation consiste à remplir, par mélange à base de ciment, tout ou partie de la hauteur de l'espace annulaire entre un tubage et les parois du trou. cette opération a pour but:

- ✓ .Protéger le forage contre les pollutions extérieures.
- ✓ Elle ancre définitivement le tubage au terrain.
- ✓ protéger la colonne de tubage contre la corrosion.
- ✓ Aboutir à l'adhérence du tubage aux parois du trou de forage.
- ✓ Colmater une cavité ou des grosses fissures qui engendrent de fortes pertes de boue lors de forage.
 - ✓ préservation de la qualité des eaux souterraines.
 - ✓ Supprimer des problèmes liés à la géologie des terrains forer (les argiles, les évaporites, terrains meubles.etc.).
 - ✓ Rendre étanche l'espace annulaire et empêcher la pollution par les eaux de surface, des nappes souterraines mises en exploitation.

✓ Préparation du laitier de ciment : Cette opération consiste à remplir avec un mélange eau + ciment (laitier de ciment) l'espace annulaire au dessus du massif de gravier jusqu'à la surface du sol. Le dosage est d'environ 50 litres d'eau pour 100 kg de ciment, ce qui donne 75 litres de laitier. Si vous disposez de bentonite, utiliser le mélange suivant : 75 litres d'eau, 4 kg de bentonite et 100 kg de ciment; ce mélange évitera à l'eau de filtrer hors du ciment, mais le temps de prise sera légèrement supérieur. Pour les ouvrages profonds le ciment de PORTLAND est le mieux adapté. La préparation du mélange s'effectue avec un mixer et une table de service pour recevoir et ouvrir les sacs de ciment

✓ Différentes méthodes de cimentation .La technique de cimentation est adoptée suivant la profondeur et l'architecture du forage. Parmi les techniques employées on cite:

1. Cimentation par les tiges
2. Cimentation par le tube ancré
3. Cimentation par le tube suspendu
4. Cimentation par canne dans l'annulaire

Les trois premières méthodes de cimentation s'appliquent uniquement pour les forages en gros diamètres et relativement profonds. La quatrième est utilisée pour les forages de moins de 50 mètres.

Le tubage à cimenter est muni d'un sabot destructible équipé d'une balle plastique (même diamètre que celle d'une balle de tennis) faisant office de valve. Le ciment injecté sous pression par les tiges pénètre dans l'espace annulaire par l'orifice du sabot qui est obturé par la balle dès l'arrêt de l'injection (Fig.).

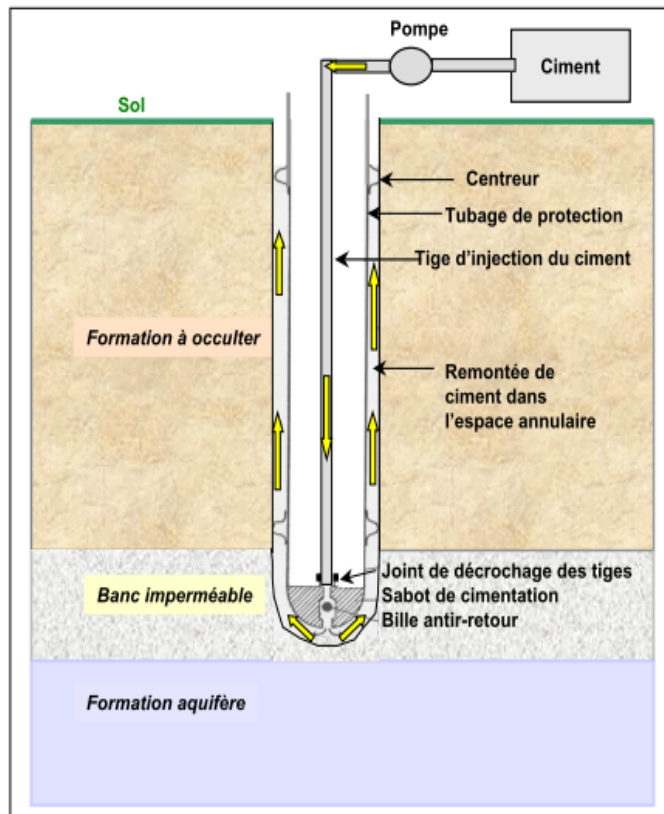


Fig. : Cimentation par les tiges

✓ A la base du tubage à cimenter des fenêtres ont été préalablement percées pour permettre la circulation de boue puis de ciment. Le volume théorique de ciment est introduit dans l'ouvrage et remonte dans l'espace annulaire sous la pression d'un joint séparateur poussé par un volume d'eau ou de boue et qui vient obturer les fenêtres de pied de tubage lorsque la cimentation est terminée.

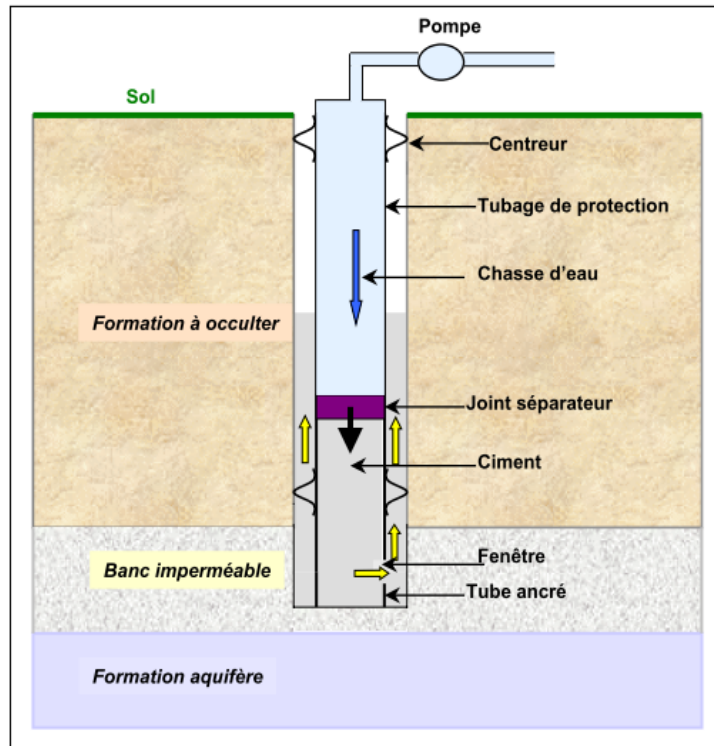


Fig. : Cimentation par tube ancré

Sous l'effet d'une chasse d'eau ou de boue, un bouchon destructible (joint séparateur) pousse dans l'espace annulaire le volume de ciment théorique introduit dans le tubage.

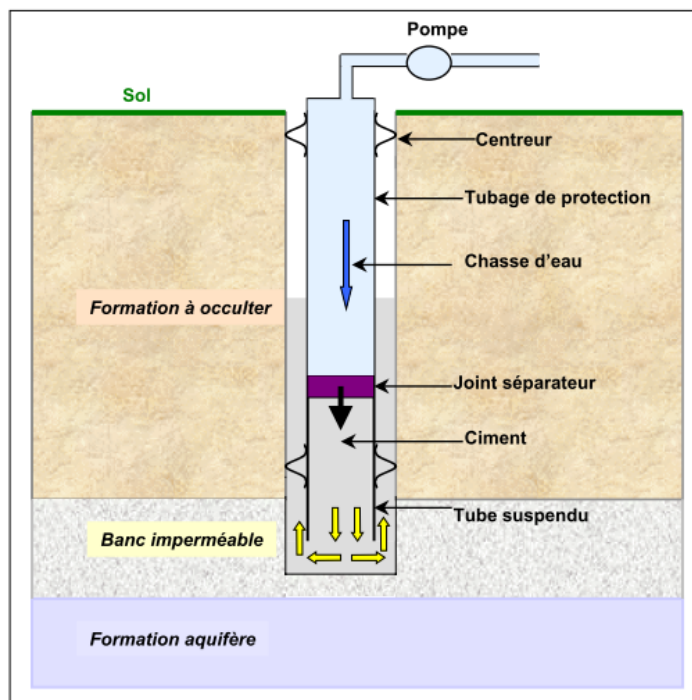


Fig. : Cimentation par tube suspendu

✓ Une garniture de petit diamètre (environ 1") est descendue dans l'espace annulaire jusqu'au pied du tubage (ancré dans le terrain). Le ciment y est injecté sous pression, si nécessaire en remontant progressivement la canne de cimentation.

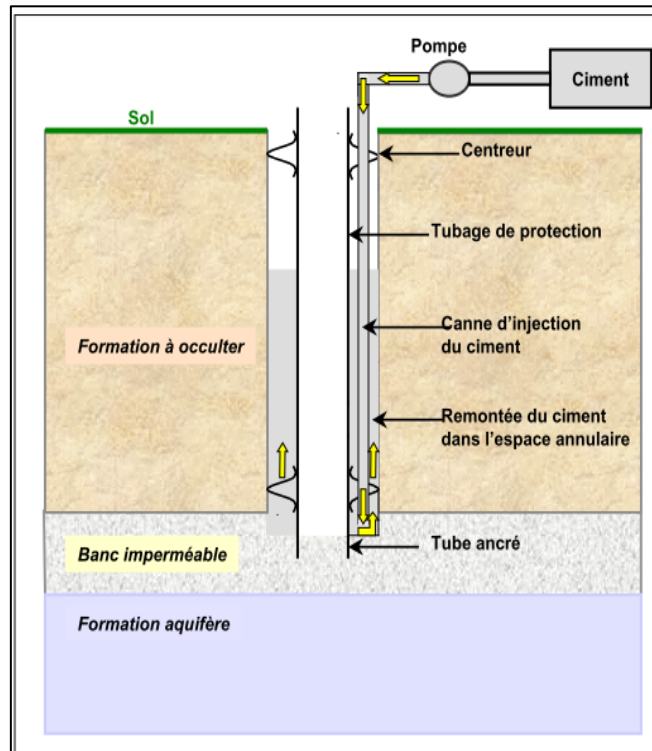


Fig. : Cimentation par canne dans l'annulaire

CHAPITRE4: DEVELOPPEMENT DE PUIITS

1. Introduction
2. Auto-développement
3. Les ponts de sable
4. Les méthodes de développement de puits
5. Control du fin développement

I. .INTRODUCTION

Après que le tubage et le massif filtrant sont en place, il est nécessaire de procéder au développement. Cette opération consiste à améliorer la perméabilité naturelle de la formation aquifère autour de la crépine. Le développement a également pour but de stabiliser l'aquifère dans la zone de captage, d'éliminer le filtrat pour améliorer la perméabilité de l'aquifère.

Malgré la mise en exploitation sans cette opération permet aussi l'amélioration de la perméabilité de la formation aquifère (auto-développement), elle aura un effet destructrice sur le matériel de pompage Cette opération est sans effet sur les ponts de sables qui risquent de venir ensabler le forage.

Pour cela le développement d'un forage est une étape très importante qui permet d'éliminer ;la plupart des particules fines du terrain et du gravier filtre qui pourraient pénétrer dans le forage, le reste du filtrat de la boue et d'éliminer le ponts de sable qui s'installe sur les parois de la formation aquifère afin d'augmenter le débit exploitable et de produire une eau propre

II. LES PROCEDES DE DEVELOPPEMENT

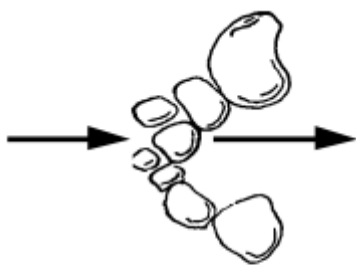
Il existe plusieurs moyens qui s'offrent à nous pour opérer un développement, notons:

- le sur-pompage
- le pompage alterné
- Développement par pitonnage
- le développement pneumatique.
- Développement par lavage au jet sous pression
- Développement chimique

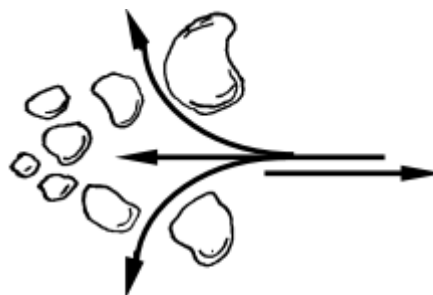
✓ le sur-pompage: Le développement par sur-pompage, consiste à mettre provisoirement le forage en production par un pompage à un débit supérieur à celui de l'exploitation estimé.

Cette méthode peu entrainé provoque une compaction des sédiments fins entraînant une diminution de la perméabilité, la création d'un ponts de sable , en fin le forage pourra etre exploité par un pompage

au
sa



Un courant unidirectionnel provoque des ponts de sable



Un courant alterné disloque et détruit les ponts de sable

dessous de
capacité
optimale.

✓ Le pompage alterné, consiste aussi à mettre le forage en production, avec en plus des arrêts brusques de la pompe (Fig. 1.10) : condition de création d'un pont de sable. Ces arrêts et des variations de pression qui ont pour effet de développer l'aquifère. Cette méthode contribue à la destruction des ponts de sable, mais elle a un risque d'usure du matériel de pompage.

✓ Développement par pistonnage : Alternation d'un mouvement vertical ascendant et descendant d'un piston dans le forage provoqueront

a) A la descente, une compression de la nappe avec refoulement de l'eau et les fines particules dans la formation

b) A la remontée, une dépression attirant les fines particules et l'eau dans la crépine

L'inversion du flux dans la crépine permet l'élimination des ponts de sable.

NB Pour que cette méthode soit efficace, le piston doit être resté dans la partie supérieure non crépinée du forage ;

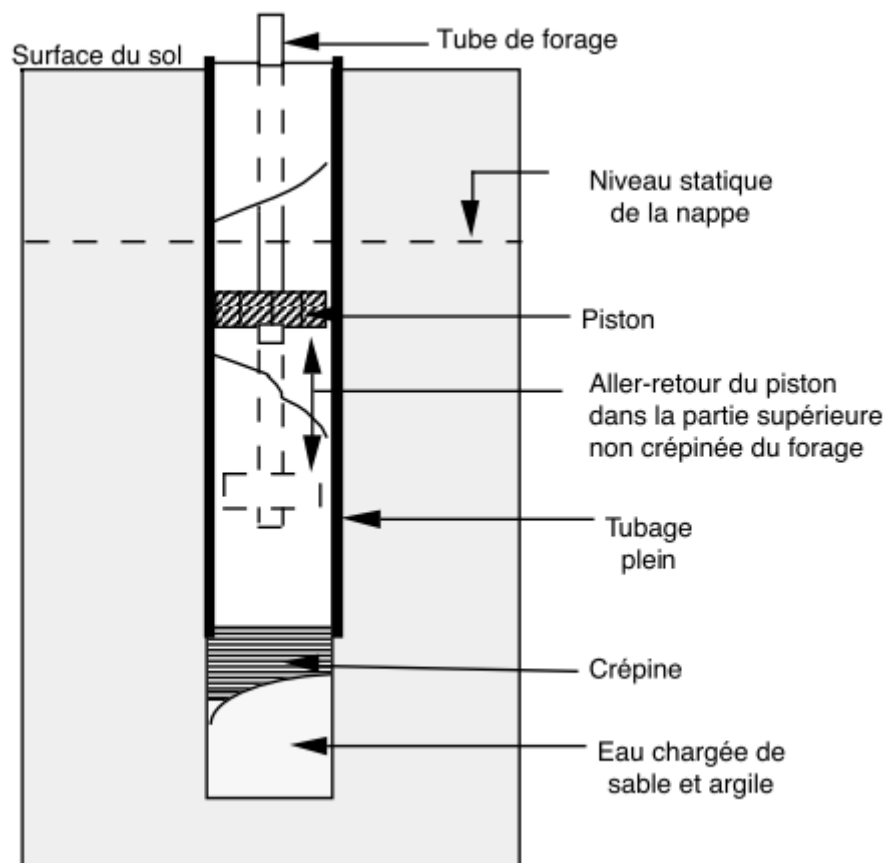


Figure 1.10 Développement par pistonnage.

✓ Le développement pneumatique (l'air lift) Ce procédé utilise le même principe que le développement par pistonnage, en combinant l'action de flux et de reflux de l'aquifère autour de la crépine, provoquée par les grands volumes d'air introduits dans le forage. Il est le plus efficace et le plus repondue, cat il est utilisé dans les terrains consolidés que non consolidés. Bien qu'il existe deux méthodes pour ce type de développement:

- 1) la méthode à forage ouvert, qui consiste à alterner les phases de pompage à l'émulseur et de soufflage brusque,
- 2) la méthode à forage fermé, pour laquelle le casing est hermétiquement clos par un joint.

L'opération consiste à alterner les phases de pompage à l'air lift et les phases de soufflage direct d'air au niveau des crépines. Pratiquement, cela consiste à introduire deux tuyaux dans le forage (Fig.01):

- 1) un tuyau galvanisé ou PVC 1"1/2 appelé tuyau d'eau, par lequel l'eau pompée remontera à la surface,
- 2) un tuyau polyéthylène monté sur une toupie appelé tuyau d'air qui est introduit dans le tuyau d'eau et qui injecte de l'air comprimé.

En fonction de sa position à l'intérieur du tuyau d'eau, il permettra de pomper l'eau du forage ou de souffler à l'inférieur du tubage. Cette consiste à alterné opérations pompage et soufflage.

- Pompage:
 - descendre le pied du tube d'eau à 0.60 m environ du fond du forage.
 - descendre le tube d'air dans le tube d'eau, en le bloquant à environ 0.30 m au dessus du tube d'eau (position de pompage) avec une pince étai;
 - installer un té à la sortie du tube d'eau pour canaliser le jet.
 - Ouvrir l'air et laisser s'écouler l'eau pompée, jusqu'à ce qu'elle soit claire.

- Soufflage :
 - fermer le tube d'air, et descendre le pied du tube d'air à environ 0.30 m en dessous du tube d'eau, soit 0.60 m plus bas que précédemment (position de chasse d'air).
 - ouvrir la vanne d'air : l'eau contenue dans le casing est pulsée.
 - refermer et rouvrir brusquement la vanne d'air plusieurs fois.

- Pompage :

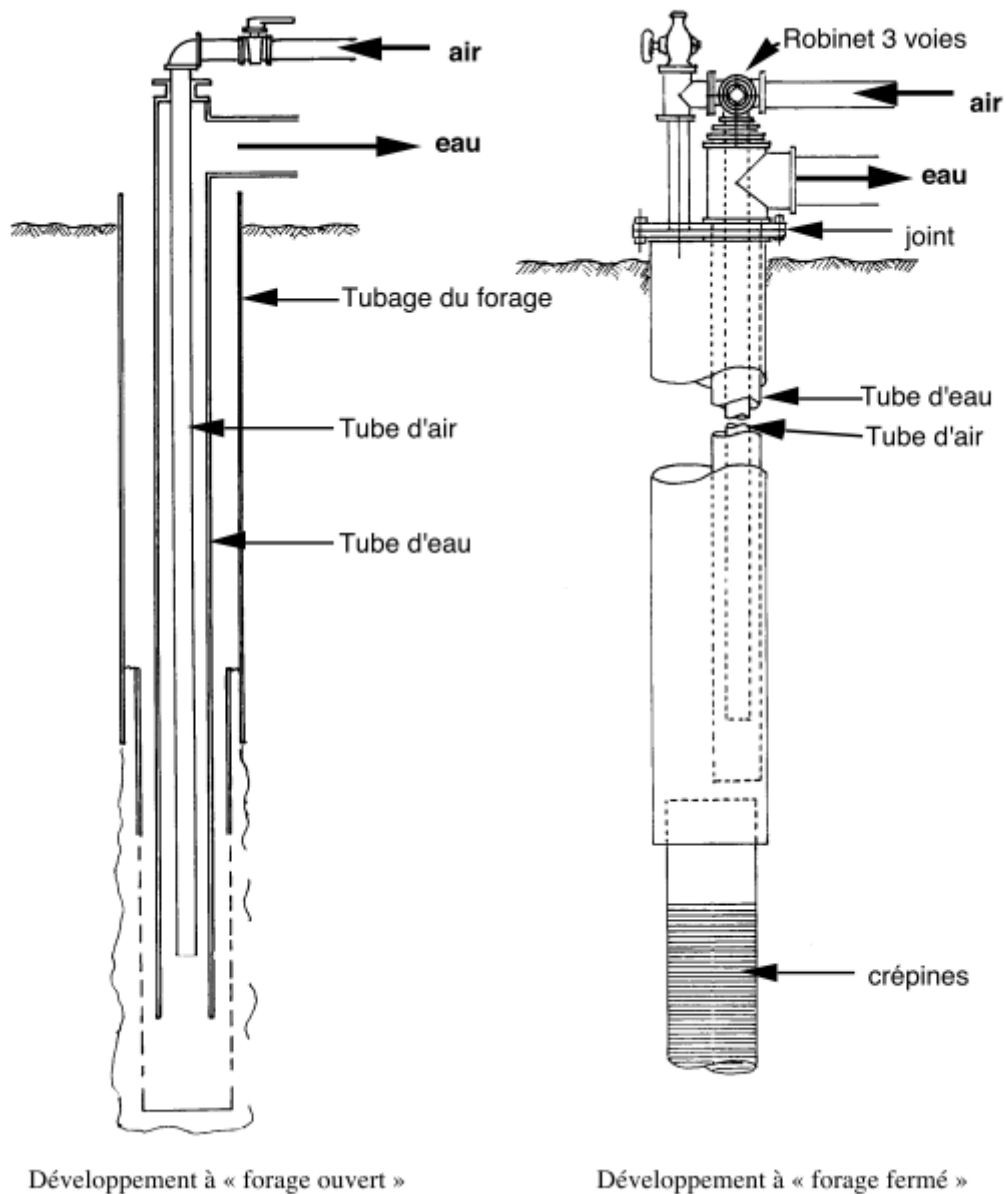
- remonter ensuite le tube d'air de 0.3 m à l'intérieur du tube d'eau : l'eau éjectée est très trouble (renversement de flux donc turbulence dans la formation autour de la crépine).
- Renouveler l'opération sur toute la hauteur de la crépine
- quand l'eau est redevenue claire, remonter le tube d'eau de 1 m et recommencer les opérations (alternance pompage et soufflage) sur toute la hauteur de la crépine;
- recommencer ensuite en repartant du bas, et continuer le processus jusqu'à ce que l'eau sorte claire.
- Terminer par un nettoyage du casing. Lorsque vous êtes arrivés au dessus de la crépine, redescendre le dispositif en fond de forage et pomper pour sortir le sable déposé dans le fond.

Si votre forage est colmaté par de l'argile, la bentonite, vous devez rincer le forage de la façon suivante:

- placer vos tubes en fond de forage, en position de soufflage (tube d'air en dessous du tube d'eau);
- connecter le refoulement de la pompe à boue sur le tube d'eau
- refouler de cette manière de l'eau propre dans le forage en même temps que vous soufflez de l'air. Une circulation qui va rincer le forage se crée ainsi : l'eau descend par le tube d'eau et remonte par le casing.

Pour des forages de petits diamètres, 1"1/2 ou 2", un test de soufflage simple permet néanmoins de confirmer ou d'infirmer la présence d'eau. La méthode consiste à souffler à partir du bas du forage par phases successives jusqu'au dessus de la crépine.

Le développement n'est terminé que lorsque l'eau qui sort du forage est parfaitement claire, l'opération peut durer plusieurs heures. Pour vérifier si l'eau est claire, la recueillir dans un seau et observer les éventuelles matières en suspension.



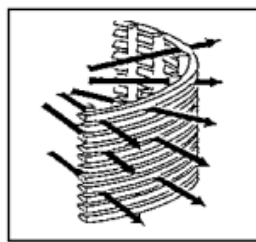
Fig; Schéma d'un émulseur air lif.

- Développement par lavage au jet sous pression

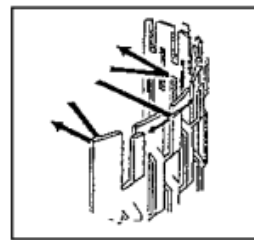
C'est une méthode simple, dans laquelle un outil à jets d'eau sous pression permet, par rotation et déplacement vertical, de traiter toute la longueur de crépine. Cette méthode permet aux fines particules de pénétrer dans la crépine où elles sont récupérées ensuite par pompage ou avec une soupape. L'efficacité du procédé dépend du type de crépine (Fig.) : Elle sera maximale pour des crépines à ouverture continue du type Johnson.

L'outil à jet comprend deux ou quatre buses horizontales de 6 à 12mm d'ouverture ; il est monté à la base d'une colonne rigide de tube de 2 pouces, de la ligne de sonde, ou, même, d'un flexible de refoulement. Pour que l'énergie du jet soit utilisée au maximum sur la formation et ne soit pas perdue à l'intérieur de la crépine, il est bon que l'extrémité de chaque buse ne soit pas distante de plus de 20mm de la crépine. L'efficacité du procédé dépend beaucoup de la pression du jet. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des pressions de 50 à 70 kg/cm², ce pendant, on peut déjà commencer à opérer avec des pressions de 7 à 8 kg/cm², surtout si on a pu éliminer le cake de la formation avant la pose de la crépine.

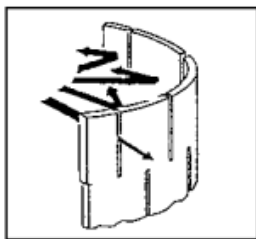
L'efficacité du procédé dépend beaucoup de la pression du jet. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des pressions de 50 à 70 kg/cm², ce pendant, on peut déjà commencer à opérer avec des pressions de 7 à 8 kg/cm², surtout si on a pu éliminer le cake de la formation avant la pose de la crépine.



Crépine à fil enroulé



Crépine à nervures repoussées



Tube nervuré



Crépine à persienne

Figure Influence du type d'ouverture de la crépine sur l'efficacité du développement au jet sous pression (d'après F-G. DRISCOLL, 1986).

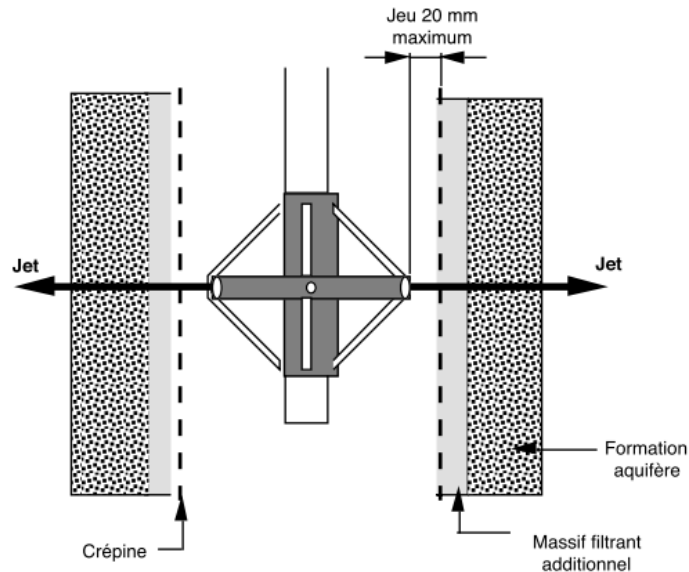


Fig. : Principe de développement par lavage au jet sous pression.

Développement chimique : Ce moyen est utilisé pour les terrains aquifères carbonatés. Cette méthode consiste à injecter par gravité ou mieux sous pression des produits chimiques (Acide ou polyphosphates, sels de soude) et 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.

1) Les acides sont particulièrement efficaces dans les roches solubles carbonatées (calcaires, dolomies). En général, on utilise de l'acide chlorhydrique dilué. Le volume d'acide à utiliser augmente à chaque opération d'acidification : il varie de 2 à 5 fois le volume du trou à acidifier. Cette acide 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.

2) 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 œuvre s'effectue par des pistonages successifs pour obtenir un effet mécanique qui déstabilise le dépôt argileux.

3) D'autres produits provenant de sels de soude (pyrophosphates tétra-sodiques hexamétaphosphates de sodium, etc..) peuvent être utilisés à doses faibles pour éliminer le filtres formés sur la paroi du forage par le fluide de circulation. Leur limite d'emploi est fixée par la température qui doit rester inférieure à 60-70° C. 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 poly-phosphates 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 flocculant pour les argiles.

III. CONTROL DU FIN DEVELOPPEMENT

Un bon développement est achevé lorsque l'eau extraite de l'ouvrage ne contiendra plus d'éléments fins indésirables et sortira claire. Bien que cet indice n'est pas toujours suffisant pour juger l'optimisation d'un bon développement. En effet, ce procédé peu éliminé cette fraction de sable, sans qu'il pourra augmenter la perméabilité de l'aquifère.

Par conséquent, les mesures de perméabilité effectuées sur le forage lui-même permettront de juger d'efficacité de développement et renseigneront sur le moment où celui-ci sera achevé. Ils ya plusieurs méthodes pour mesurer la perméabilité (LUGEON, LEFRANC-MANDEL et M.BRILLANT).

Aussi les courbes tracées après plusieurs périodes de développement (profondeurs de l'eau (m) en fonction du temps de remplissage (min)) permet de juger l'efficacité du développement.

Lorsque les courbes se superposent, le développement est terminé, la perméabilité ayant atteint son maximum.

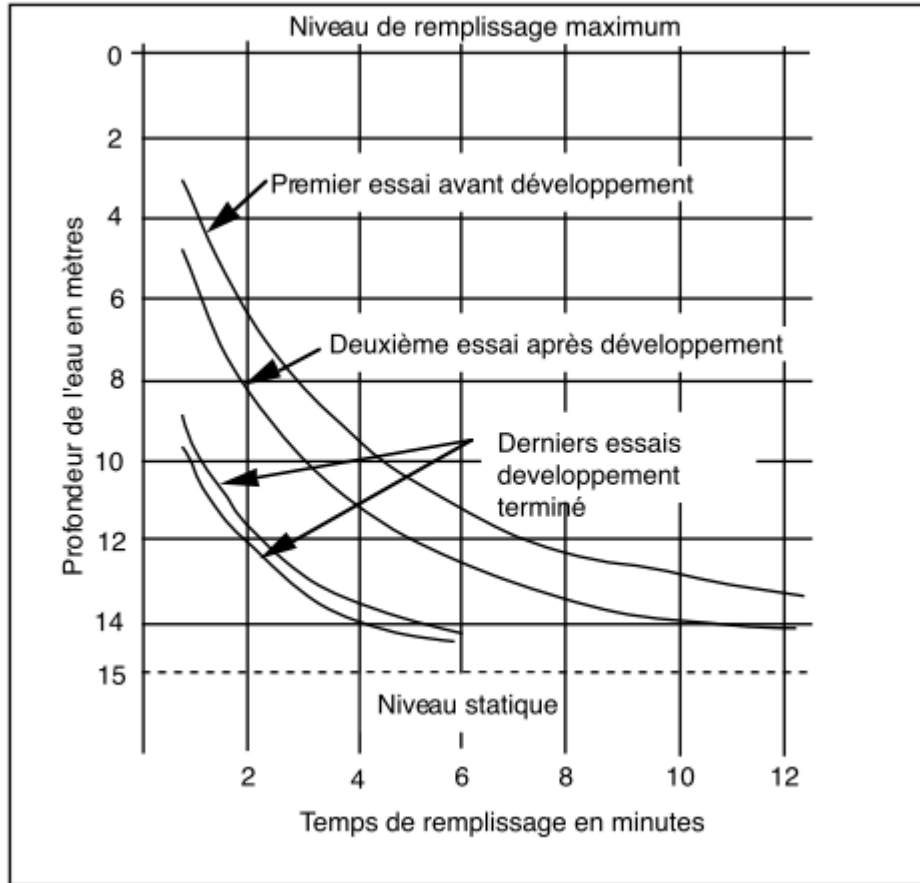


Figure : Contrôle de développement par essai d'absorption (d'après Mabillot.A.1971).

CHAPITRE 5: EXPLOITATION ET PROTECTION DE CAPTAGE D'EAU.

1. Construction de l'avant-puits
2. Pompes et essais de pompage
3. Equipement d'exhaure dans le forage
4. Nettoyage et désinfection
5. Suivi et rapport de forage
6. Protection des captages d'eau souterraine

Introduction

L'alimentation en eau potable de la population s'effectue généralement par un ou plusieurs ouvrages qui captent l'eau dans son milieu naturel puis la dérivent vers un réseau de distribution. Ces ouvrages représentent des points névralgiques, et particulièrement vulnérables, dans le processus permettant d'offrir au public de l'eau propre à la consommation humaine. Cette situation oblige les autorités concernées une protection pour ces ouvrages(tell que: la construction de l'avant puits; tête de puits; l'établissement des périmètres de protection approché, immédiat et éloigné)

I. CONSTRUCTION DE L'AVANT-PUITS

Après avoir terminé tous les opérations de forages y compris le développement ont au doit procédé à sa protection. Cette tâche consiste à construire un avant-puits, qui permet de protéger le forage contre la contamination de surface. Les démarches à suivre:

1) les deux premiers mètres a partir du sol (généralement la section qui était protégée par le tube guide durant le forage) doit être nettoyés et élargis, puis rempli de ciment jusqu'au niveau du sol, ou de préférence légèrement au-dessus du sol (Fig.01

2) Au-dessus du massif filtrant devra être remblayé par un bouchon composé de gravier ordinaire, de gravillons, de granulés de bentonite, ou simplement de déblais du forage.

Pour les forages où le niveau statique de l'eau est élevé, et qui sont couverts par une couche superficielle perméable, on se contente par une protection superficiel par l'établissement des périmètres afin d'éviter toutes contaminations par les eaux de surface.

II TETE DE PUIITS

Après que le tubage et le massif filtrant sont en place et l'achevement de la cimentation , il est nécessaire d'installé la tête de puits. Elle doit être réalisée avec soin car elle conditionne l'étanchéité du captage. C'est un élément très important pour éviter une pollution accidentelle par les eaux superficielles.

Classiquement la tête de puits est cimentée sur une profondeur d'au moins trois mètres par rapport au sol et elle se prolonge par une hauteur de tube plein d'au moins 0,5 m au dessus du sol. Ce tube doit être fermé hermétiquement de manière à éviter toute contamination de la nappe aquifère.

Enfin, la tête de puits est généralement incluse dans un petit ouvrage de génie civil. Ce dernier doit être conçu pour une meilleur protection de l'ouvrage ,optimisation d'exploitation .Aussi l'ouvrage doit être équipé d'un dispositif anti-intrusion et correctement appareillé de manière à

pouvoir facilement enlever la pompe et la colonne de captage. Enfin, elle doit être parfaitement ventilée de manière à éviter la condensation qui pourrait être source de pollution.

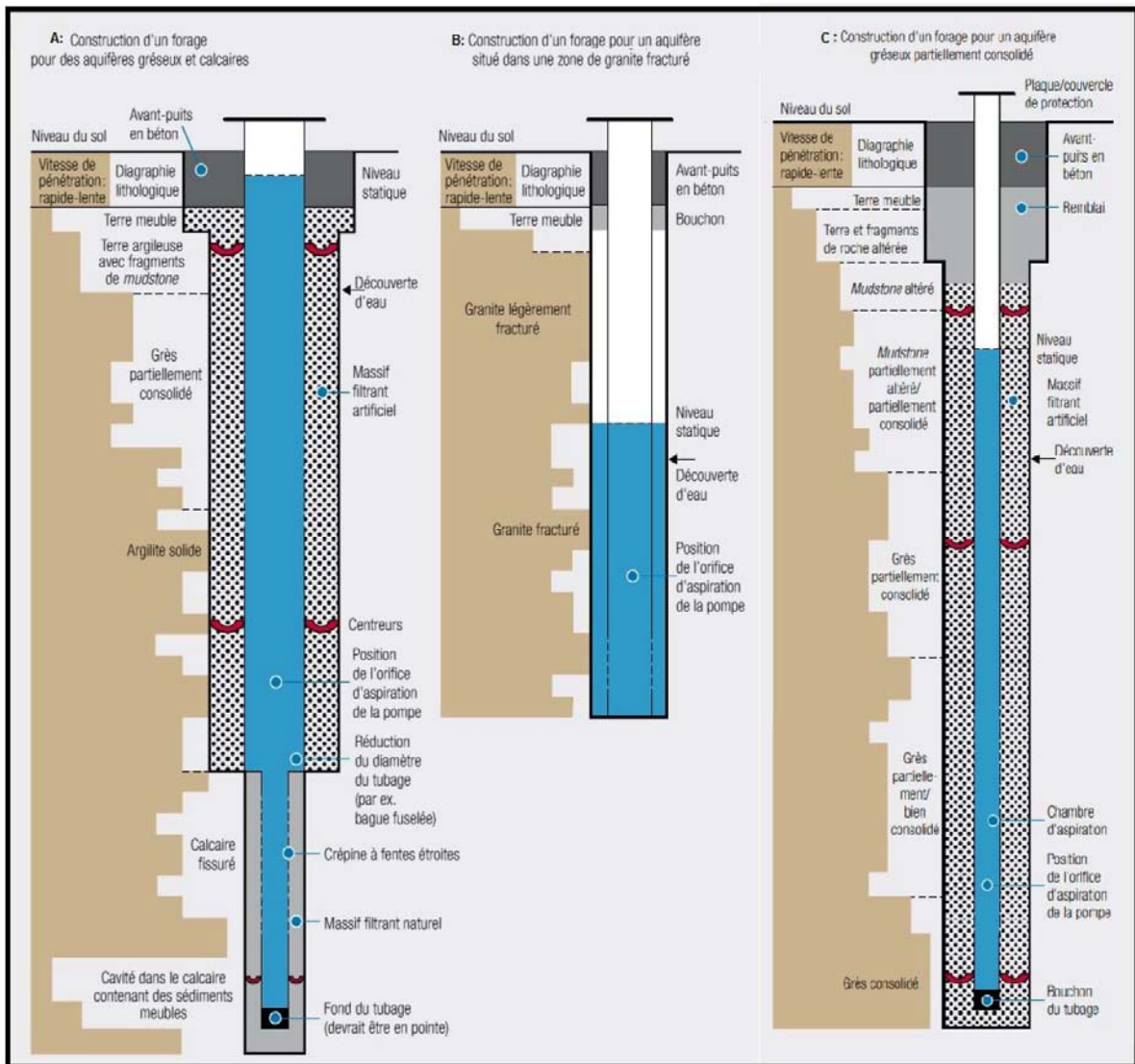


Fig. : Différents type d'avant-puits.



Fig. : Tête de puits

I. NETTOYAGE ET DESINFECTION

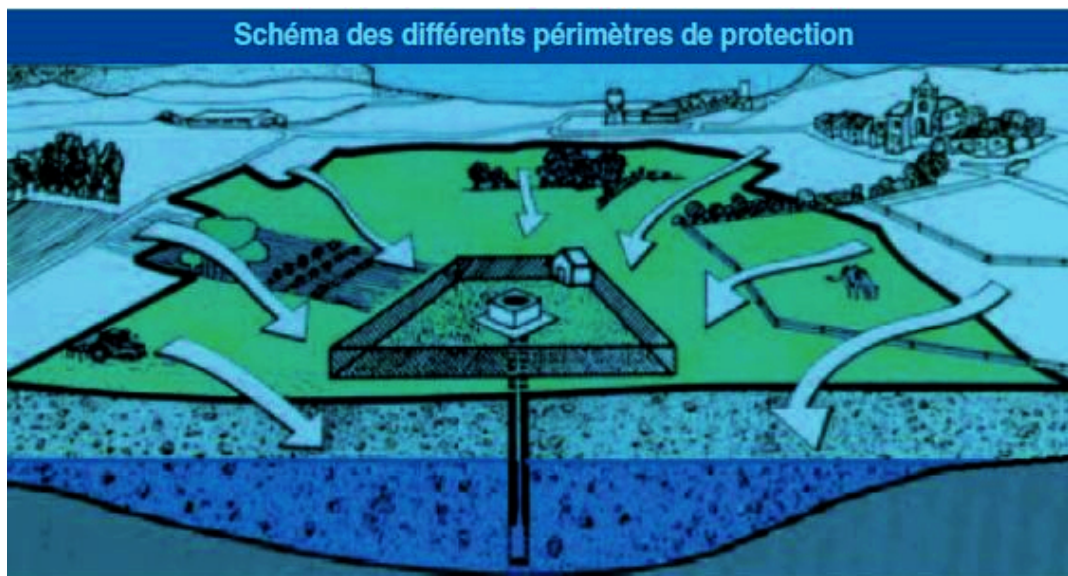
- Pour les ouvrages destinés à la consommation en eau potable, cette opération consiste à procéder à un nettoyage et désinfection de tous les produits introduits dans cet ouvrage. Aussi on pourra préconiser des ajouts de chlore industriel. La quantité de chlore nécessaire dépend du volume d'eau contenu dans le forage. Il faut concevoir 1 litre de solution chlorée à 0,2% par 100 litres d'eau du puits. L'eau du puits doit être mélangée avec la solution chlorée et doit être au repos au moins 30 minutes avant d'être distribuée.

Notons que tous les produits de désinfection sont généralement des produits dangereux ce qui fait appel à une forte prudence lors de la manipulation. Par conséquent les opérations de dilution, d'injection et de gestion des rejets nécessitent des précautions d'usage (voir les fiches techniques pour la manipulation du produit et effet nocif sur la santé humaine et l'environnement).

I. Périmètres de protection

En vue de conforter cet objectif de préservation de la qualité de l'eau captée puis distribuée, l'hydrogéologue prévoit la détermination de trois périmètres de protection pour appréhender les risques de pollutions provenant des activités exercées à proximité des ouvrages

- périmètre de protection immédiate dont le but est d'éviter toute introduction directe de substances polluantes dans l'eau prélevée et d'empêcher la dégradation des ouvrages.
- un périmètre de protection rapprochée où peuvent être interdites ou réglementées les activités, dépôts ou installations susceptibles de nuire directement ou indirectement à la qualité de l'eau prélevée.
- un périmètre de protection éloignée permettant de réglementer les activités, dépôts ou installations susceptibles de dégrader la qualité de la ressource en eau. Plus particulièrement destinée aux points de prélèvement d'eau souterraine. Toutefois, compte tenu des vitesses de transfert mises en jeu en cas de pollution éventuelle, la sécurité de l'approvisionnement en eau potable est alors assurée essentiellement par:
 - l'existence d'équipements de traitement de l'eau adaptés aux caractéristiques de l'eau brute et pouvant absorber les variations de ces caractéristiques.
 - le développement d'une action de prévention portant sur l'inventaire et l'analyse des risques de pollution accidentelle ainsi que sur leur réduction.
 - la mise en place d'un dispositif de surveillance continue et d'alerte ainsi que l'établissement d'un plan d'intervention.



Le périmètre de protection immédiate (PPI)

Le PPI est obligatoire et correspond à l'environnement proche du point d'eau. Ce périmètre est acquis par la collectivité, régulièrement entretenu, clôturé et toute activité y est interdite. Ses limites permettent d'empêcher la détérioration des ouvrages et d'éviter les déversements de substances polluantes à proximité immédiate du captage.



Le périmètre de protection rapprochée (PPR)

Le PPR correspond à une zone de vulnérabilité représentant tout ou partie du bassin d'alimentation du captage. Au sein de ce périmètre, les activités qui peuvent être à l'origine d'une pollution de l'eau sont interdites ou réglementées.



Le périmètre de protection éloignée (PPE)

Le PPE n'est pas obligatoire. Ce périmètre est créé dans le cas où certaines activités pourraient être à l'origine de pollutions importantes et lorsque des prescriptions particulières paraissent de nature à réduire significativement les risques. Le PPE correspond à tout ou partie de la zone d'alimentation du point d'eau, voire à l'ensemble du bassin versant.

Fig. : Délimitation des périmètres de protection de captage d'eau.