

Chapitre II : Forage d'eau

Technique de forage

Il existe de nombreuses méthodes de forage dont la mise en œuvre dépend de paramètres très divers :

1. Forage par battage

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 trois types de battages :

Le battage au treuil (procédé canadien) ;

Le battage au câble (procédé pennsylvanien) ;

Le battage rapide appelé aussi le procédé Raky.

Où le trépan est fixé sur un train de tige creusé afin qu'il permet à l'eau de circuler. 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.

Pour avoir un bon rendement, on travaille toujours en milieu humide en ajoutant quelque litre d'eau au fond de trou.

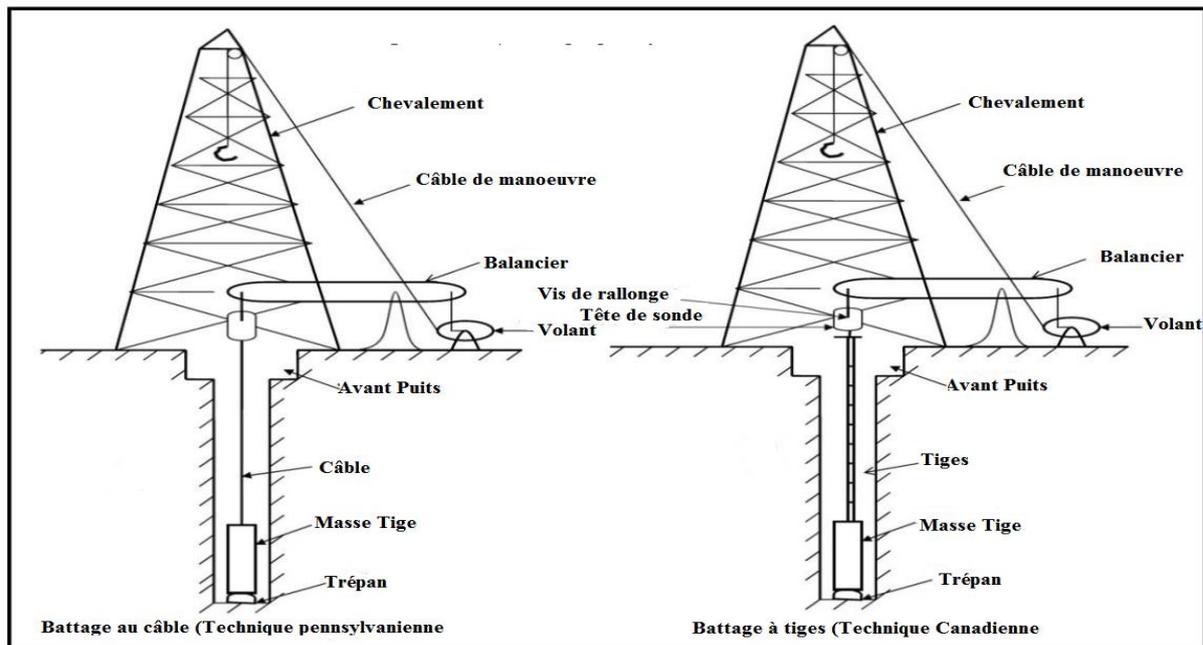
Le trou est nettoyé au fur et à mesure de l'avancement par descente d'une soupape permettant de remonter les débris (cuttings).

L'Avantages

- La technique de forage par battage peut forer n'importe quelle formation ;
- La technique est indiquée pour les terrains durs (les terrains karstiques ou fissurés) ;
- C'est un procédé peu coûteux ;
- Nécessite moins d'eau (40 à 50 l/h) et de n'importe quelle qualité ;
- Ne nécessite pas de fluide de forage (boues) d'où l'absence du risque de pollution de la nappe ;
- Aucun problème dans des zones fissurées (risque lié à la perte de boue) ;
- Technique bien adaptée pour les forages de moyenne profondeur.

L'Inconvénients

- Vitesse d'avancement assez faible;
- Méthode peu adaptée dans les terrains plastiques ou bouillants dans lesquels le tubage à l'avancement est nécessaire surtout en l'absence du fluide de forage ;
- Difficultés pour arrêter des venues d'eau ;
- Impossibilité de contrôler la rectitude ;
- Impossible de réaliser le carottage ;



Coupes schématiques des différents types de forage par battage

2. Forage rotary

Le rotary est utilisé spécialement dans les terrains sédimentaires non consolidés pour les machines légères, mais les machines puissantes de rotary peuvent travailler dans les terrains durs (hydrocarbures). Les appareils de forage sont munis de capteurs qui permettent l'enregistrement et le suivi de ces paramètres principaux : tension du câble, pression d'injection de la boue, pression en tête de puits, vitesse de rotation, couple de rotation, débit de boue, densité, viscosité, viscosité, température et résistivité.

Pour avoir le meilleur rendement d'un forage rotary, il convient d'être très attentif sur les trois paramètres suivants:

- poids sur l'outil
- Vitesse de rotation
- Débit des pompes

2.1. Forage rotary en circulation directe

Avantages

- peut forer n'importe quelle formation à l'exception des formations cavernueuses ;
- La profondeur du forage peut être très importante (plus que 2000 m) ;
- Vitesse d'avancement importante (jusqu'à 100m/jour en 8" ¹/₂ en terrain tendre) ;
- Venues de fluide contrôlable ;
- Le forage n'est pas perturbé par les terrains peu stables ou plastiques ;
- Consolidation des parois en terrains meubles par dépôt de cake.

Inconvénients

- Le fluide de forage ne permet pas l'observation directe de la qualité et la quantité des eaux des formations traversées ;

- Difficulté de forer dans les terrains fissurés à cause de la perte de circulation de la boue ;
- Colmatage possible des formations aquifères par utilisation de certaines boues (bentonite) ;
- Difficulté d'observation des cuttings ;
- Développement et nettoyage des puits d'où un surplus de temps et d'argent.

2.2. Forage Rotary en circulation inverse

Avantages

- La perméabilité de la formation autour du trou est peu perturbée par le fluide de forage ;
- Bon rendement dans les terrains tendres ;
- Une information géologique plus précise et quasi instantanée ;
- Une information géologique continue. La remontée des cuttings par le train de tiges diminue fortement les risques de pertes de fluide et de cuttings lors de la traversée de zones fissurées, fracturées ou cavernueuses ;
- La remontée des cuttings par le train de tiges diminue fortement les risques d'éventuels colmatages ou contamination des aquifères traversés ;

Inconvénients

- Nécessite beaucoup d'eau (Présence d'un fluide de forage et de risque de colmatage (la même que circulation directe) ;
- la reconnaissance de niveaux producteurs au moment de sa foration, nécessite un contrôle continu (arrêt de forage);
- risque d'occulter des informations importantes sur un niveau producteur.

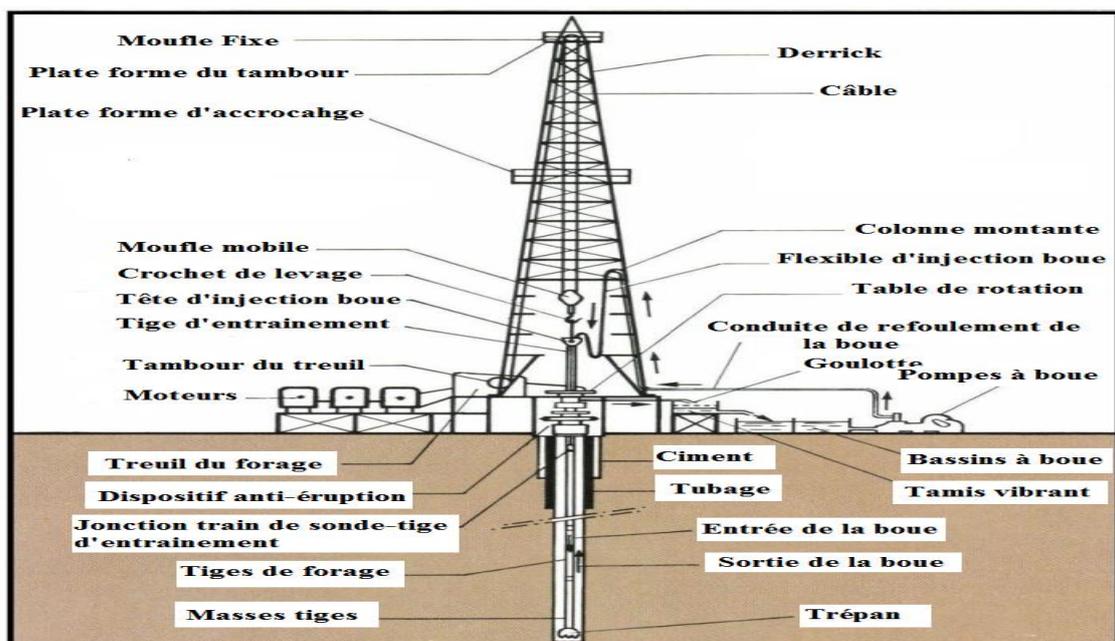


Schéma simplifié d'une installation de forage rotary

3. Forage au marteau fond de trou (MFT)

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 forage hydraulique et principalement en terrains durs et très dur (calcaire et grès)

Avantages

- Avancement rapide et profondeur d'investigations pouvant dépasser les 300 m de profondeur (en fonction du diamètre et de la puissance du compresseur d'air) ;
- Bonne observation des cuttings et des zones productrices lors du forage ;
- Mise en place simple ;
- Fluide de forage utilisé (air) est bien adapté au forage d'eau en général ; absence de Produit polluants.

Inconvénients

- Procédé peu adapté dans les terrains non consolidés (sable) ou plastiques (argiles). Ce qu'il nécessite l'emploi de mousse injectée dans le circuit d'air pour favoriser la tenue des parois et/ou la remontée des cuttings ;
- Le fluide (air) peut perturber lors du fonçage les observations relatives à la qualité du Fluide d'un niveau producteur en occultant les venues de gaz ;
- Risque de formation de bouchons de cuttings, nécessitant de fréquents nettoyages du trou par soufflage.
- Nécessité d'utilisation de compresseurs très puissants voire de supresseurs en cas de foration sous des hauteurs d'eau importantes ;
- Mauvaise identification de chaque niveau producteur en cours de foration, le fluide recueilli en tête d'ouvrage intégrant l'ensemble des horizons traversés.

4. Technique de forage par havage

Le forage par havage est plus connu sous le nom de procédé Benoto, consiste à creuser le terrain à la base du tubage en position verticale. Limité à des ouvrages très peu profonds. 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.

Avantages

- Pratique avec grande performance sur un terrain meuble ;
- Gros diamètre (puits) ;
- Technique incontournable en présence de sol instable et alluvionnaire ;
- Avancement rapide à faible profondeur dans des formations meubles, notamment les sols meubles et les alluvionnaires (en l'absence d'éléments grossiers).

Inconvénients

- Méthode inadaptée aux terrains durs ;
- Faible profondeur (environ 30m) ;
- Difficulté pour remonter les tubages de soutènement après la mise en place des crépines et du massif filtrant.

Chapitre III : Fluide de Forage

Fluide de Forage

Fluide de forage est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments, ...).

Rôles des fluides de forage

- La remontée au jour des déblais, (cuttings) ;
- Le maintien des cuttings en suspension en cas d'absence de circulation ;
- La consolidation et le soutènement des parois de forage par la pression hydrostatique et le dépôt du cake sur les parois ;
- Aide le trépan dans son travail de désagrégation de la roche par augmentation de l'action abrasive (par le jet) ;
- Le refroidissement et lubrification des outils de forage et de carottage ;
- La diminution du poids apparent du train de sonde ;
- La protection contre le gonflement ou l'affouillement (creusage) de certaines couches traversées ;

Classification des fluides de forage

1. Boues de forage

On appelle boue un mélange plus ou moins complexe d'un liquide de base eau ou huile avec des produits divers (argile et produits chimiques). On distingue plusieurs types de boue de forage

1.1. Boue naturelle

C'est une boue de départ, utilisée pour le forage rapide des terrains de surface, elle varie largement d'une région à l'autre. Souvent les couches superficielles sont composées de terre végétale, argile et de sables non consolidés. La situation est idéale quand l'eau de préparation est douce et les couches superficielles forment naturellement de la boue.

1.2. Boues bentonitiques ordinaires

A / Boue bentonitique

Une boue bentonitique est une boue à base d'eau douce et bentonite ou la viscosité est maintenue à l'aide des phosphates. Elle est utilisée pour les milieux doux et dans les conditions peu sévères de filtration (filtrat naturel). La bentonite est un type d'argile de la famille des montmorillonites, très fine, la dimension des particules est inférieure à 1µm et de densité de 2,6. A l'hydratation.

B/ Boue amidonnée

C'est des boues bentonitiques traités au tanin, soude et à l'amidon pour maintenir la viscosité à des profondeurs supérieures à 1500 m. la soude est ajoutée pour augmenter la dispersion des particules argileuses. Le tanin donne la couleur rouge à la boue.

C/ Boue calcique à l'amidon

Ce sont des boues bentonitiques à base d'amidon et de la chaux à fort pH pour maintenir et contrôler la viscosité.

1.3. Boue salées

En milieu salé (> 35 g/l de Na Cl), les bentonites sont inefficaces et ne servent alors que de support colloïdal. Employée pour forer dans les milieux salifères et les zones argileuses, mais il faut signaler l'effet corrosif sur la garniture (il faut ajouter les anticorrosifs dans la boue).

1.4. Boue à l'huile

Ce sont des boues dans lesquelles le liquide de base est l'huile brute ou raffinée. Ce type de boue est apparu suite aux problèmes de colmatage (bouage) des couches productives par la filtration et dans les terrains ayant la propriété, en s'hydratant, d'augmenter considérablement de volume (les argiles gonflantes).

1.5. Boues à émulsion

Tout en offrant le même avantage (filtrat nul) leur utilisation est beaucoup étendue puisqu'elles sont utilisées pour traverser les formations gonflantes, des terrains gypseux ou salés et les couches productives. Ce sont les émulsions de gas-oil et de boue à base d'eau. L'émulsifiant le plus utilisé est l'extrait de résine de pin.

1.6 Boue à polymère

C'est une substance formée par l'union bout à bout de deux molécules ou plus de la même qualité de chaîne dans un autre composant d'éléments et de proportions analogues, mais à plus haut poids moléculaire et à propriétés physiques différentes. Elles ne sont pas biodégradables généralement, et leur destruction nécessite une action chimique pour réduire leur viscosité à celle de l'eau (lavage).

2. Air comprimé

C'est de l'air comprimé qui, injecté à la place de la boue de forage, assure toutes les fonctions que jouent la boue de forage. Il est recommandé dans le cas des pertes totales répétées de la boue et lors du forage des couches productrices sous faible pression. Il devient impossible de forer avec l'air lors de venues importantes d'eau. Le forage avec l'air nécessite un obturateur rotatif (diverter) en tête de puits.

3. Mousse

Le forage avec la mousse, c'est conserver les avantages du forage avec l'air et de s'affranchir de la présence d'eau en injectant de la mousse résultant du mélange air + eau + agent moussant (se dose à de 0,2 jusqu'à 2% du poids d'eau utilisé). Les mousses sont des dispersions d'un volume de gaz (relativement) important dans un volume de liquide relativement faible.

Equipement d'un forage

1. Tête de puits

Une fois le tubage d'un forage profond (hydrocarbures) est cimenté jusqu'à une certaine hauteur qui n'arrive pas jusqu'en surface (sauf pour la première colonne de tubage), la partie non cimentée doit être suspendue pour que les tubes ne s'écrasent pas. La tête de puits est un corps dans lequel le tubage est suspendu par des coins d'ancrage. Elle sert à suspendre la partie non cimentée du tubage et assurer l'étanchéité entre le trou du forage et l'extérieur

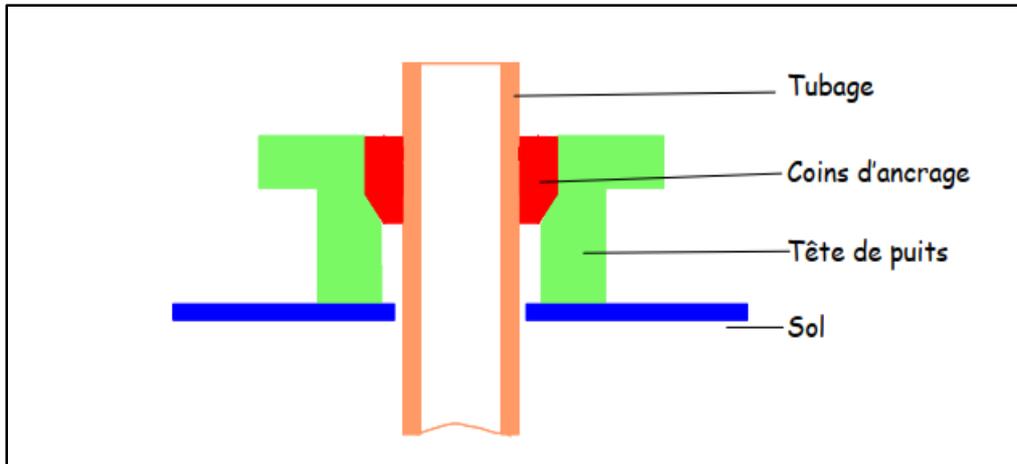
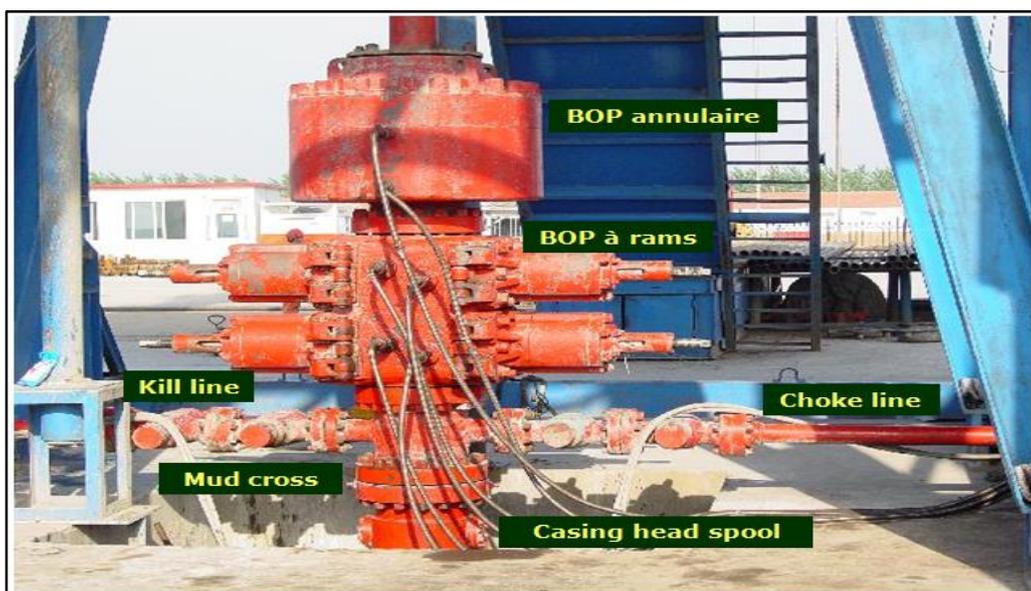


Schéma tête de puit

2. Obturateur (BOP)

Lorsqu'un fluide (gaz, pétrole, eau) sort de la roche dans laquelle il est contenu (réservoir) et s'introduit dans le puits, on dit que c'est une venue. Il faut alors fermer immédiatement le forage, de crainte que le fluide remonte en poussant la boue au-dessus de lui. Si le fluide gagne une certaine hauteur, il devient difficile à contrôler et stopper, ce qui s'appelle éruption (Blow out). Afin d'éviter ces éruption, on place, au-dessus de la tête du forage, des obturateurs (Blow out preventers = BOP), qui ne sont que des vannes qui ferment le forage, même s'il contient des tiges.

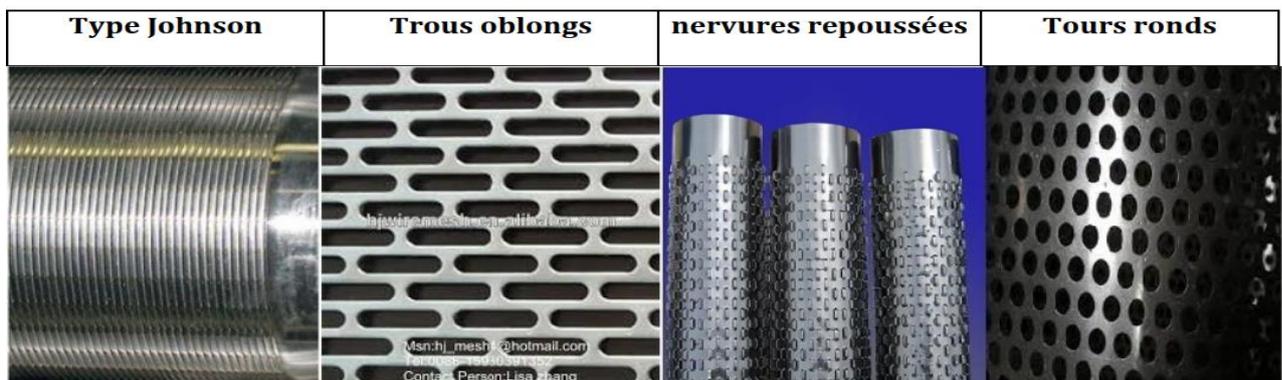


Obturateurs sur forage

3. Crépines

La crépine est constitué l'élément principal de l'équipement d'un ouvrage d'exploitation. Pour les forages hydrauliques les crépines sont placées à la suite du tubage plein, face à une partie ou à la totalité de la formation aquifère, les crépines doivent:

- ✓ Permettre 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 encours d'exploitation ;
- ✓ Induire des pertes de charge minimales.

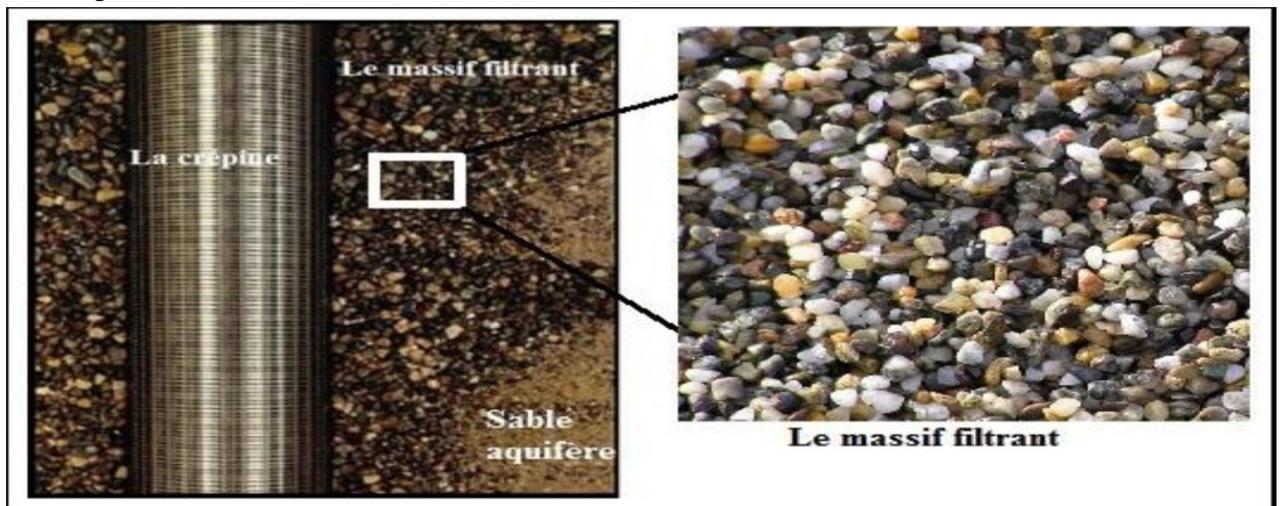


Crépines en acier

4. Massif filtrant

Le massif filtrant appelé gravier additionnel est constitué par des matériaux meubles formés d'éléments Calibrés (graviers, granulats), disposé dans l'espace annulaire pour empêcher l'érosion souterraine et prévenir le colmatage et la réduction conséquente de l'efficacité de forage.

Le gravier filtre doit être assez uniforme, calibré, propre, rond et siliceux de préférence. Il ne doit pas être calcaire, ni concassé.



Massif filtrant

Le développement

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 ainsi que le reste du cake de boue et d'arranger le terrain autour de la crépine afin d'en augmenter la perméabilité.

Cette opération permet d'augmenter de façon significative le débit du forage initialement estimé. La nappe est en effet progressivement mise en production, l'aquifère est libéré de ses fines, la perméabilité et le débit instantané augmentent.

Gradient et Perméabilité

Le gradient hydraulique i , est proportionnel à la vitesse à la vitesse du flux et inversement proportionnel à la comme la perméabilité. Le gradient diminue si la perméabilité augmente.

D'après la loi de Darcy : $K = Q/Si$

Avec

K = coefficient de perméabilité

Q = débit

S = section traversée

i = gradient hydraulique et

$i = h/d$, avec h rabattement et d distance par rapport au forage.

Le gradient croit lorsque l'on se rapproche du forage et c'est donc sur la zone qui entoure le forage que le développement doit agir.

Une formation aquifère mise en production par un forage se développe automatiquement en pompage.

Le rabattement est maximum dans le forage et décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne. C'est le cône de dépression. La dimension de ce cône dépend de la nature du terrain, de l'alimentation de la nappe ou de ses limites, ainsi que du temps et du débit de pompage.

Les procédés de développement

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

- Le surpompage ;
- Le pompage alterné ;
- Le développement pneumatique.

1. Le développement par surpompage, consiste à mettre provisoirement le forage en production par un pompage à un débit supérieur à celui de l'exploitation future. L'ensemble des fines et des sables de la zone de pompage sera entraîné par ce surpompage et le forage pourra être exploité à un régime inférieur. C'est donc un moyen de nettoyer le forage de ces fines, mais la capacité de l'aquifère n'a pas forcément été exploitée en totalité. Les ponts de sable n'ont pas été détruits.

2. Le pompage alterné, consiste aussi à mettre le forage en production, avec en plus des arrêts brusques de la pompe qui provoquent la chute de la colonne d'eau agissant sur l'aquifère par des variations de pression qui ont pour effet de développer l'aquifère
3. Le développement pneumatique (l'air lift) est le plus efficace et le plus répandu. L'avantage est que le matériel de pompage ne subit pas de détérioration (pompage de sable).

LES ESSAIS DE POMPAGE

Objectifs des essais de pompage

- Quelle est la quantité d'eau qui peut être pompée ?
- À quel rythme ?
- Quelle pompe va-t-on choisir ?
- à quelle profondeur l'installer ?

Les essais de pompage ont comme objectifs :

- la détermination des différentes caractéristiques hydrodynamiques de la nappe aquifère :
 - La perméabilité K
 - La transmissivité T
 - L'étendue de la nappe : le rayon d'action R_a (rayon d'influence)
 - Le coefficient d'emmagasinement S
- le réglage optimal d'exploitation d'un forage pour éviter la surexploitation et l'assèchement de la nappe, à travers :
 - la détermination du débit spécifique, du rabattement spécifique, la productivité de l'ouvrage, le débit maximum admissible et le rabattement maximum admissible.
 - la détermination des durées et des périodes de pompage.
 - la détermination de la position optimale pour l'emplacement de la pompe. Et ce par l'étude de l'évolution des rabattements en fonction des débits.
- la détermination des différentes réserves d'eau dans la nappe (réserve exploitable, réserve renouvelable, réserve non renouvelable).

Types d'essais de pompage :

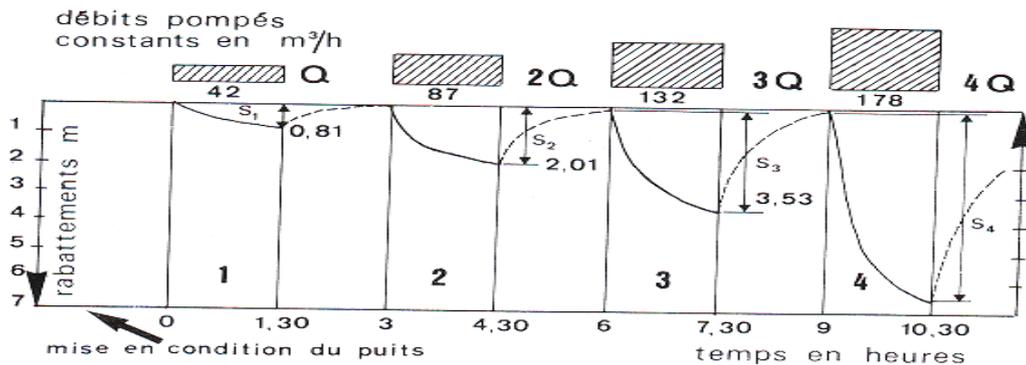
On distingue deux types d'essai :

1. Essais de pompage à paliers de débits de courte durée :

Il s'effectue en réalisant des paliers de débit constant pendant une courte durée. On mesure le rabattement à la fin de chaque palier ainsi que le débit. Chaque palier est suivi par un arrêt d'une durée permettant la remontée de niveau d'eau.

Par expériences, trois paliers avec débits croissants, dont chacun de deux heures sont suffisants. L'essai de puits (well test) : permettant de déterminer les caractéristiques de l'ouvrage et de son environnement immédiat pour déterminer si l'ouvrage répond aux besoins des usagers, de définir ces limites d'exploitations, et la possibilité d'envisager des réhabilitations pendant l'exploitation (remplacement de la pompe par exemple). Il permet également d'établir le programme d'équipement de l'ouvrage (tubage, crépine, massif filtrant).

Ce type d'essais s'effectue avec le pompage par paliers de courtes durées.



Essai de pompage par palier de courte durée

Interprétation

a- calcul des pertes de charge :

Le rabattement mesuré dans l'ouvrage à un instant donné, est la somme de deux composantes nommées pertes de charge caractéristiques du complexe aquifère- ouvrage.

- une perte de charge linéaire provoquée par l'écoulement laminaire dans l'aquifère au voisinage de l'ouvrage, notée :

$$B.Q$$

- une perte de charge quadratique provoquée par l'écoulement turbulent dans l'ouvrage, la crépine et le tubage, notée :

$$C.Q^2$$

Le rabattement total sera :

$$S = B.Q + C.Q^2$$

Cette équation est appelée l'équation de Jacob, établie pour les nappes captives, alors qu'elle n'est plus valable pour les nappes libres que pour des rabattements mesurés inférieures à l'un dixième de l'épaisseur de la nappe.

Avec s : en m, et Q : en m^3/h

B et C : sont les coefficients de perte de charge linéaire et quadratique respectivement.

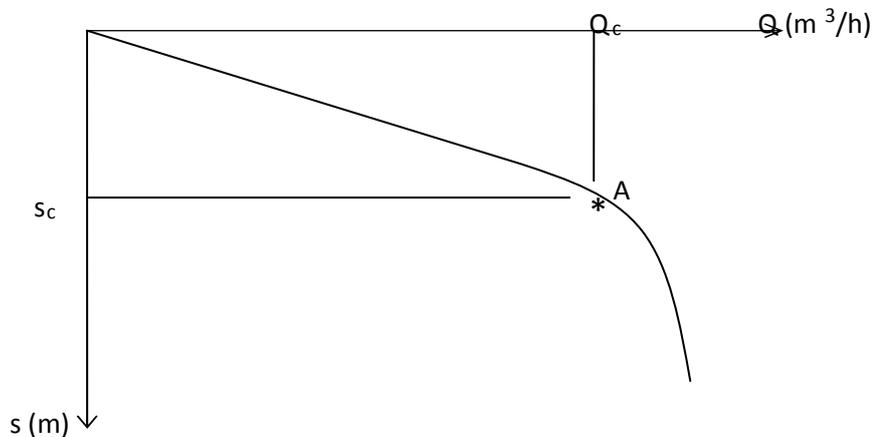
b- Estimation du débit maximal d'exploitation

On obtient en fin de chaque palier des couples mesurés (s_i, Q_i). En reportant ces valeurs sur un graphique arithmétique, avec s en ordonnées et Q en abscisse pour obtenir finalement la courbe du rabattement en fonction des débits $s = f(Q)$.

Cette courbe est formée par deux parties :

- une partie droite : correspondant à la perte de charge linéaire, dont la perte de charge quadratique est nulle.
- une partie courbe : correspondant à la somme de la perte de charge linéaire et quadratique. Quand cette partie est convexe : la perte de charge quadratique est importante, et

quant elle est concave, elle se traduit par un essai non valable (mesures altérés, décolmatage, amélioration de la circulation de l'eau au voisinage immédiat de l'ouvrage).



La courbe caractéristique $s = f(Q)$

Les deux parties se lient par le point A correspondant au débit critique Q_c .

Le débit maximal d'exploitation est fixé légèrement inférieur au débit critique.

Si aucune rupture de pente de la courbe $s = f(Q)$ n'apparaît clairement, le débit maximal est fixé en fonction du rabattement maximal admissible, soit 1 m au-dessus des crépines. La résolution de l'équation de Jacob donne :

c- Estimation des coefficients de perte de charge :

En reportant les valeurs des couples ($s_i/Q_i, Q_i$) : (rabattements spécifiques, débits), en plaçant les valeurs de rabattements spécifiques en ordonnées et les valeurs de débits en abscisse ; pour tracer la courbe du rabattement spécifique en fonction du débit $s/Q = f(Q)$. Par comparaison avec l'équation de Jacob, nous obtenons :

$$s/Q = C \cdot Q + B$$

Cette courbe est toujours une droite.

Avec C : la pente de la droite.

Et B : l'ordonnée à l'origine de la courbe (la droite). Cette courbe peut prendre trois formes :

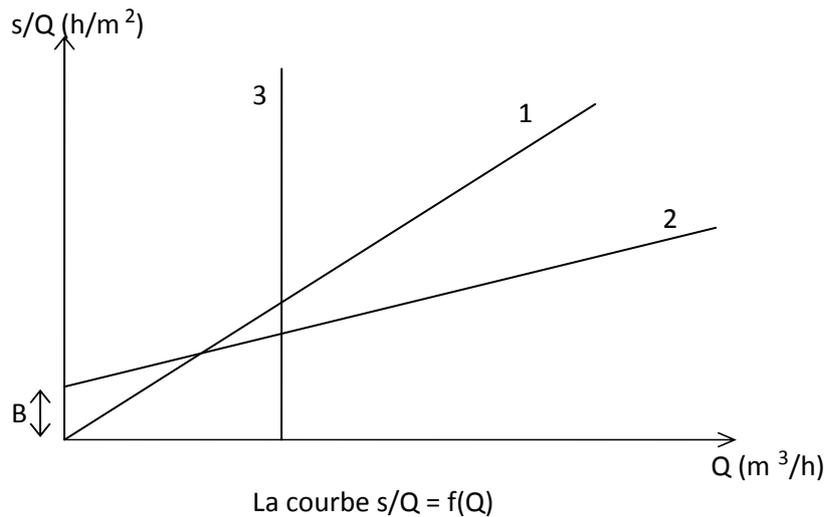
- une droite passant par l'origine (droite n°1 sur la figure) : B est nul ; traduisant un régime turbulent et des pertes de charge turbulentes (quadratiques) résultant principalement de l'écoulement dans l'ouvrage.

Et les pertes de charges laminaires sont négligeables.

- une droite verticale (droite n°3 sur la figure) : C est nul ; traduisant un régime laminaire, et des pertes de charge laminaires résultant principalement de l'écoulement dans l'aquifère.

Et les pertes de charge turbulentes sont négligeables.

- une droite recoupant l'axe des coordonnées ; dans ce cas, la perte de charge résulte de l'écoulement dans l'ouvrage et dans l'aquifère.

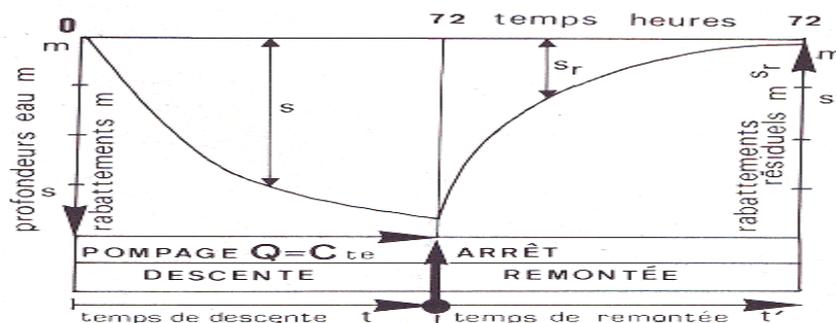


d- Estimation de la profondeur d'installation de la pompe :

La profondeur d'installation de la crépine de pompe est fonction du niveau dynamique prévisible. Ce niveau est donnée par le rabattement induit par le débit d'exploitation (débit max.), majoré par des variations piézométriques annuelles (on augmente la cote de la crépine de 2 à 3m).

2. Essai de pompage de longue durée

L'essai de pompage de longue durée est exécuté à l'aide d'un seul palier de débit constant d'une durée qui peut dépasser les 72 heures selon le but fixé. La remontée doit être observée d'une durée égale.



Essai de pompage de longue durée.