

LE FORAGE

I. EXECUTION DU FORAGE

1. Définition :

Un forage est une cavité, approximativement tubulaire, ayant un diamètre nominal défini par l'outil de forage. Le diamètre peut varier énormément, on parle de forage petit diamètre pour des diamètres allant jusqu'à 250 mm puis de forages à gros diamètres. Le forage est généralement rempli d'un fluide qui peut être de nature variable : boue à la bentonite, eau, mousse, boue à l'huile ou air.

2. Emplacement du forage

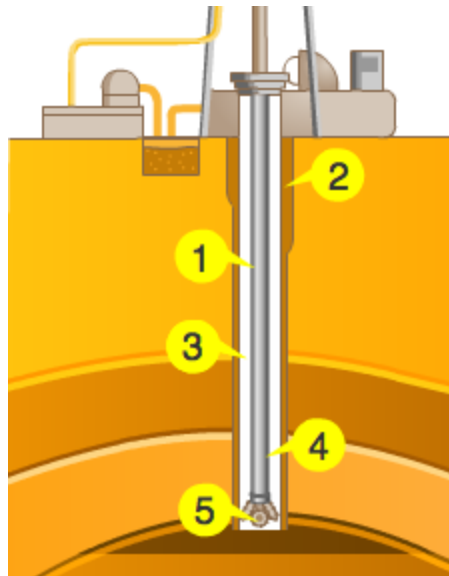
Après avoir mené différentes études géologiques et géophysiques, les experts ont déterminé l'emplacement théorique de l'aquifère. Afin de confirmer les théories, il faut à présent forer, c'est-à-dire percer en profondeur, afin de confirmer la présence d'eau.

Avant d'implanter les installations de forage, il faut d'abord *déterminer l'endroit idéal où s'effectuera le forage*. Pour ce faire, les installations sont implantées en fonction de la topographie du terrain et des précieuses informations recueillies lors de l'exploration.

3. Exécution du forage :

La foration consiste tout d'abord à mettre en place un *appareil de forage*.

La première étape est la mise en place du *Derrick* de forage, une tour métallique de 30 m de haut en moyenne, servant à introduire verticalement les *tiges de forage* (4).



Ces tiges correspondent à une chaîne de tubes vissés les uns aux autres au bout desquelles se trouve un *outil de forage* (5), le *trépan* muni de dents ou de pastilles en acier très dur.

À la manière d'une perceuse électrique, le trépan attaque la roche en appuyant mais surtout en tournant à grande vitesse : il *casse la roche, la broie en petits morceaux, et s'enfonce petit à petit dans le sol*.

A mesure que l'on s'enfonce dans le sous-sol, on rajoute une tige de forage en la vissant à la précédente et ainsi de suite.

L'ensemble des tiges avec son trépan qui creuse au bout s'appelle le *train de tiges* (1). Pour les roches très dures, les dents du trépan ne sont pas assez solides, on le remplace alors par d'autres outils de forage de différentes formes et constitués de différents matériaux.

Un *outil monobloc incrusté de diamants* est par exemple utilisé pour forer les roches les plus résistantes.

Pour éviter l'effondrement du trou, des cylindres creux en acier sont posés en même temps que les tiges sur toute la longueur du trou pour constituer un tube, ces tubes sont vissés les uns aux autres au fur et à mesure de la progression du forage : c'est le *tubage* (3).

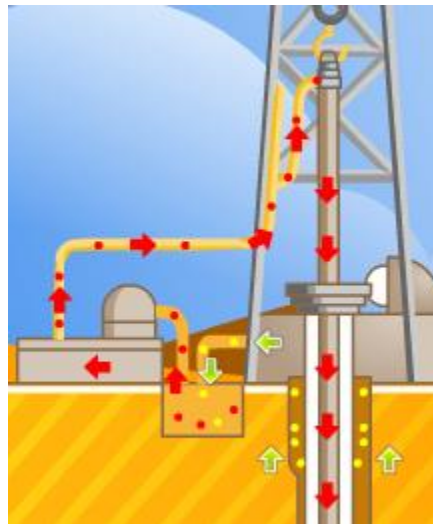
Ce tubage n'est pas directement réalisé dans la roche nue, mais est retenu par du *ciment* (2).

Plus on pose de tubes, plus le diamètre du trou de forage devient petit : le tubage posé occupe de l'espace et *réduit le diamètre initial du trou*. Ainsi, un trou de forage d'un diamètre de 50 cm au départ, peut être réduit à 20 cm après la pose de plusieurs tubages.

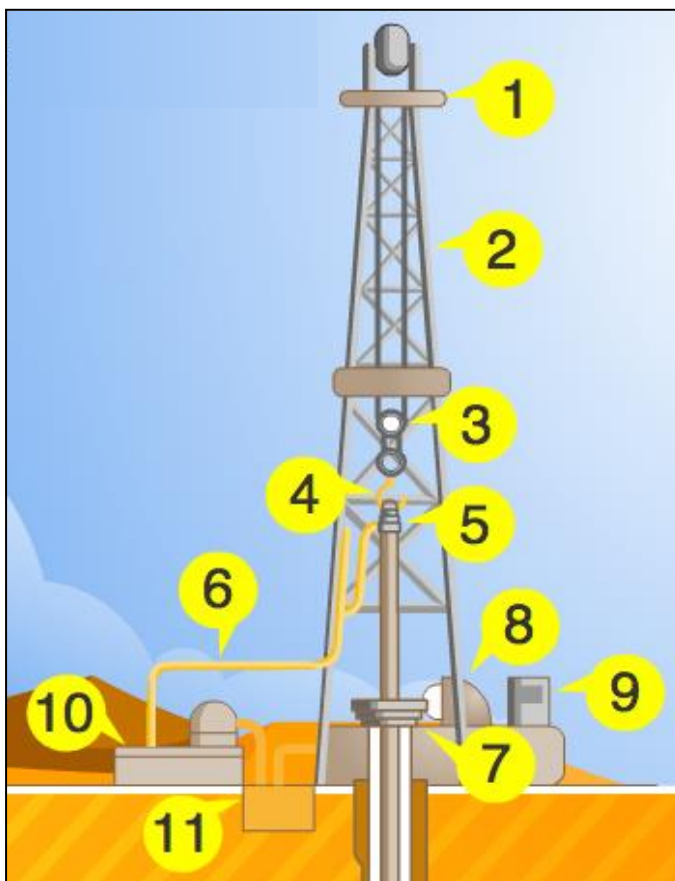
Pour éviter que le trou se rebouche au fur et à mesure du forage, il faut enlever les débris de roche et nettoyer le fond du puits. Pour cela, on utilise un *fluide de forage* aussi appelé *boue de forage* par son aspect. Ce fluide indispensable au forage a une composition spéciale déterminée par un Ingénieur spécialisé, adaptée aux terrains traversés lors du forage.

Un circuit fermé permet de recycler la majeure partie de boue utilisée. Elle est mélangée et conservée dans un bassin, acheminée par la *colonne d'injection de boue*, vers la *tête d'injection* qui la propulse dans le train de tiges. Elle descend alors jusqu'au fond du puits et "traverse" le trépan grâce à des trous percés dans celui-ci et se retrouve dans les débris. Sous l'effet de la pression, la boue remonte entre les parois du puits et le train de tiges, emportant avec elle les débris arrachés. Une fois à la surface, une conduite d'aspiration attire la boue jusqu'à un tamis vibrant qui sépare les débris de la boue, ensuite renvoyée dans le bassin de décantation. Et ainsi de suite.

Le fluide de forage sert également à *stabiliser la pression* sur les bords du puits pour leur éviter de s'écrouler, elle *lubrifie et refroidit les outils* et permet surtout de *prévenir des éruptions*.

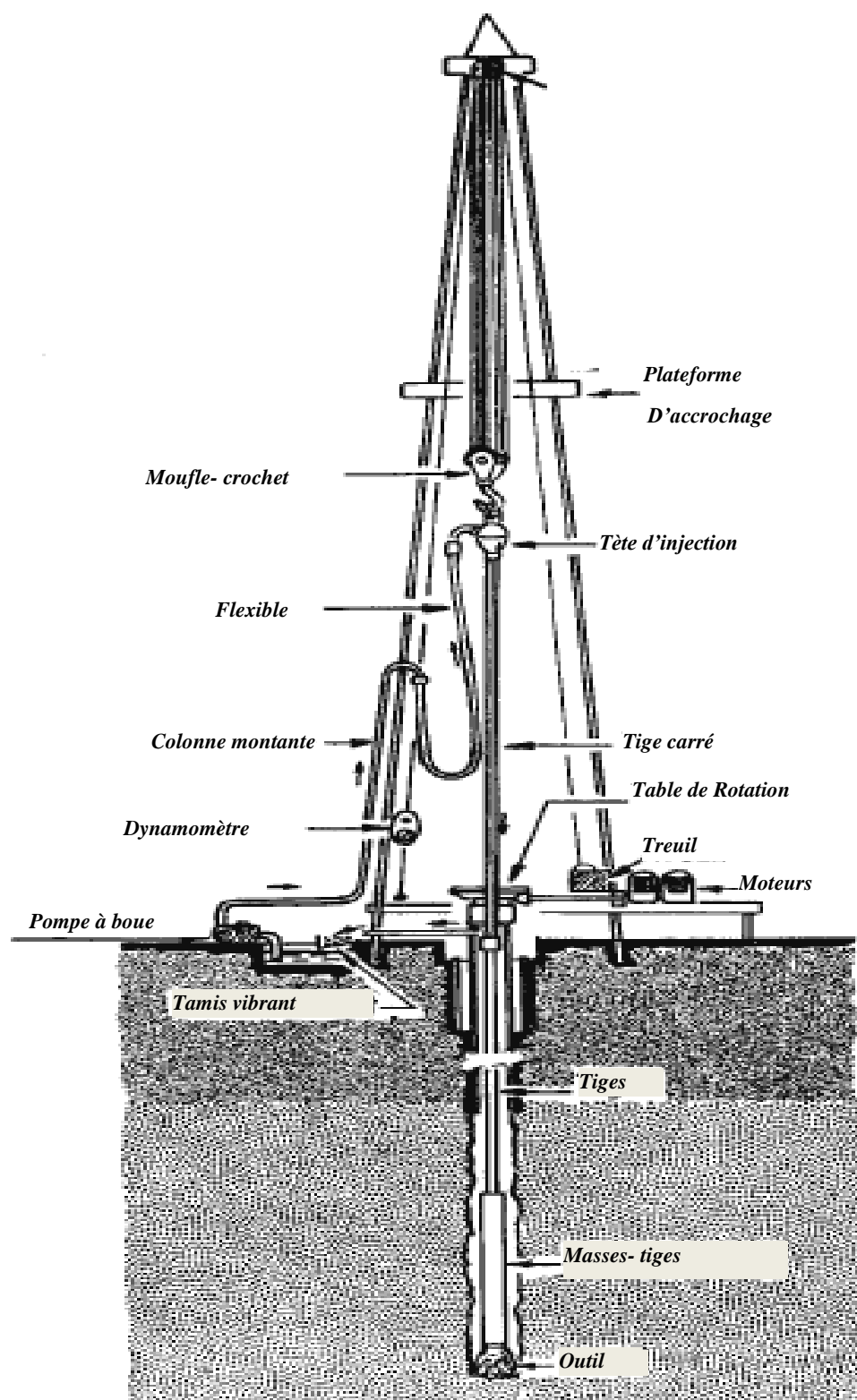


Circuit du fluide de Forage



LEGENDE :

- (1) Fixation du palan**
- (2) Derrick**
- (3) Palan mobile** (une sorte de double corde métallique très solide sous forme de poulie)
- (4) Crochet**
- (5) Tête d'injection**
- (6) Colonne d'injection de boue**
- (7) Table de rotation** entraînant les tiges de forage
- (8) Treuil**
- (9) Moteur**
- (10) Pompe à boue**
- (11) Bourbier**



Disposition schématique d'équipement d'un forage

II. Les Méthodes de Forage ; Avantages & Inconvénients

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

1. 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 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 recueilli 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. Forage au marteau fond de trou avec tubage à l'avancement : 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 œuvre un taillant pilote avec aléteur 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'aléteur sous l'effet de son propre poids et de l'énergie de percussion du marteau. Les tubes sont solidarités 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 individualisation 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.

3. Forage rotary circulation directe : 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 événements de l'outils 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 cuttings, la présence de tamis vibrants en circuit retour diminue sensiblement cet inconvénient.

4. **Forage en circulation inverse :** 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 parois 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 cavernueuses, 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.

5. Forage carotte : 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).

6. 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 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 autres 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 bouillants 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.

7. Forage par havage : 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 recommandée. 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.

8. Forage dirigé : Le forage dirigé est une technique de génie civil permettant de faire passer des canalisations et des câbles sous des obstacles (chaussées, bâtiments, cours d'eau...) sans intervenir directement sur ces obstacles. Le forage dirigé est une application récente nécessitant de puissants moyens informatiques. Grâce au forage dirigé, des ressources qu'ils étaient difficile d'atteindre en forage classique du fait d'obstacles géologiques (lithologies rebelles), deviennent accessibles. Le secteur pétrolier est très demandeur de forages dirigés ou bien sinon de forages dont on estime par modélisation ou suivi la direction empruntée.

9. Forage horizontal ou subhorizontal : Les forages subhorizontaux sont destinés à résoudre des problèmes liés par le passage de réseaux sous des obstacles réputés infranchissables. Cette technique permet aussi de résoudre des problèmes de drainage dans des glissements de terrain où l'eau est l'élément moteur. Elle peut être associée à des drains terrassés dans le cas d'assainissement de maison individuelle par exemple. Les forages réalisés sous des bâtiments permettent de drainer de façon très efficace les horizons humides. Si le forage est montant l'évacuation de l'eau se fait gravitairement. Seules les foreuses ou sondeuses ayant une rotation à 360° de leur glissière peuvent réaliser de tels travaux. Les différents types de forages peuvent mis en œuvre lors de ces opérations.

III. CHOIX D'UNE MÉTHODE DE FORATION

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 termes 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).

– Les paramètres à prendre en compte ; 1. *Nature géologique des terrains traversés*. 2. *Profondeur finale de l'ouvrage*. 3. *Nature de l'ouvrage réalisé (reconnaissance ou exploitation)*. 4. *Qualité des fluides des réservoirs*. 5. *Environnement du chantier*

1. Nature géologique des terrains traversés : 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.

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 terrain 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. Nature de l'ouvrage réalisé (reconnaissance ou exploitation)

- En phase de reconnaissance, l'objectif prioritaire sera l'acquisition de données sur la géologie et les niveaux producteurs. On privilégiera 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 (crépines et pleins) pourront être positionnés au mieux avec mise en place optimum des graviers face aux crépines et/ou des cimentations derrière les tubages pleins de protection.

4. Qualité des fluides des réservoirs.

- 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).
- 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.

5. 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 aquifère 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 œuvre doivent être étudiées au cas par cas, la conception d'un forage doit entrer dans la réflexion globale d'étude d'un aquifère 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 l'aquifère et l'opération pourra ainsi être valorisée.

IV. LES OUTILS ET LA LIGNE DE SONDE

1. Les outils de forage

1.1. Outils à lames

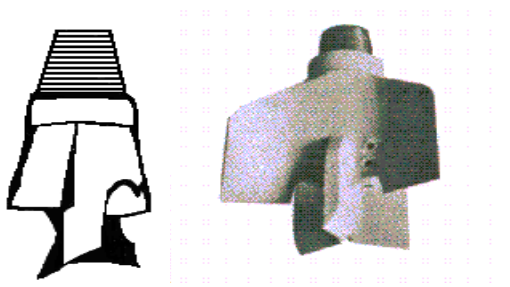
1.1.1. Queue de poisson [deux lames]



1.1.2. Trois ailes [three wings]



1.1.3. Pilote [plusieurs étages de diamètres différents]



Ces outils travaillent, en rotation, comme une fraise dans un métal, ils font des « copeaux » dans le terrain. Ils sont employés dans les formations sédimentaires compactes, à structure fine et dureté peu élevée. Malgré les avancements intéressants qu'ils procurent, leur coût peu élevé, la possibilité de reforger et affûter les tranchants qu'ils sont les seuls à offrir, bien des foreurs n'aiment pas les employer.

1.2. Outils à molettes (Tricônes ou Quadricônes) : Trois ou quatre molettes à axe horizontal ou légèrement incliné, montées sur de solides roulements à billes ou galets. Ces outils sont munis, comme les outils à lames, d'une partie filetée sur cône qui assure un montage très rapide et, après blocage à la clef, un joint rigoureusement étanche. La denture des molettes varie selon la nature du terrain. Les dents sont longues et écartées pour les terrains tendres, elles sont courtes, fines et rapprochées pour les terrains durs. Ces outils procèdent par écrasement et éclatement de la roche. Des événements calibrés ajoutent à l'efficacité des molettes en désagrégeant le terrain sous de puissants jets. Les outils à molettes sont rapidement mis hors d'usage, rares sont les entrepreneurs qui, rechargent les dents usées et, le plus souvent, ces outils périssent par leurs roulements. Dès qu'ils ont pris un peu de jeu, ils seraient dangereux de les redescendre dans le trou ; car ils

ne tarderaient pas à laisser au fond leurs mollettes et leurs roulements qu'on aurait bien du mal à « repêcher ».



Tricônes, outils montés par trois cônes rotatifs ou molettes

2. La ligne de sonde

2.1. Les masses –tiges [drill collars] : Elles sont placées juste au-dessus de l'outil. Ce sont des tubes à parois très épaisses. Leur rôle consiste à faire du poids sur l'outil. Prenons l'exemple d'une ligne de sonde descendue dans un forage de telle sorte que l'outil ne repose pas sur le fond : chaque tronçon de cette ligne supporte le poids de ceux qui se trouvent au-dessous de lui. Tous travaillent à la traction, exclusivement [si la ligne ne tourne pas] – pas de torsion – pas de flambage – pas de compression. Les éléments inférieurs fatiguent peu et celui qui est le plus exposé est celui placé sous la tige carrée. En outre, il faut savoir que, grâce au principe d'Archimède, toute la ligne de sonde, si elle se trouve allégée d'environ $1/6^{\text{ème}}$ de son poids, si elle est plongée dans une boue de densité 1,3. On pourrait, en poussant le raisonnement, trouver que les éléments inférieurs reçoivent une poussée d'Archimède supérieure à la tension qu'ils subissent du fait du poids de ceux qui se trouvent au-dessous, on en déduirait – ce qui est exacte – que les tronçons du bas subissent en fait une compression, mais celle-ci étant bien faible, nous ne la citerons que pour mémoire.

Une fois l'outil touche le fond, une compression résulte de cette circonstance, elle dépendra de la retenue du treuil, elle sera plus grande pour les éléments inférieurs.

Pour une certaine valeur de cette retenue, il existe un point sur toute la ligne de sonde où traction [tension] et compression s'équilibrent. Ce point est connu sous le nom de point neutre.

Il faut savoir qu'en cet endroit, la ligne de sonde est vulnérable et qu'on peut redouter un dévissage, d'où l'intérêt de connaître en permanence la position de ce point.

Le rôle des masses - tiges consiste à dégager les tiges de l'effort de compression, car elles sont calculées seulement pour travailler à la traction et à la torsion.

On mettra donc suffisamment de masses – tiges pour que le point neutre soit situé dans cette ligne de masses – tiges et non dans celle des tiges qui la surmonte, quelque soit le poids laissé sur l'outil.

En règle générale, l'outil ne doit pas être chargé d'un poids supérieur à 50 à 75 % du poids de toutes les masses – tiges.

On sait que toute la ligne de sonde est suspendue au crochet du mouflage installé dans le derrick. Le câble de ce mouflage est actionné par l'un des tambours du treuil. La tension du câble, mesurée et indiquée en permanence par le dynamomètre [plus connu en forage sous le nom d'appareil MARTIN – DECKER], monté sur le brin mort du mouflage, permet d'apprécier le poids apparent de toute la ligne de sonde.

La différence entre le poids réel que le foreur doit connaître, avec précision, en permanence, et ce poids apparent, donne la valeur du poids supporté par l'outil.

Ce renseignement est de première importance en rotary : trop appuyé, l'outil se détériorera rapidement, mais si la charge est trop faible, l'avancement sera très réduit ou nul.

Les masses – tiges existent en longueurs unitaires de 6 mètres ou de 9 mètres, les éléments sont raccordés entre eux par filetages sur cônes selon les normes A. P. I. [American Petroleum Institute].

Ils sont généralement cylindriques sur toute leur longueur, mais comportent souvent un rétreint à la partie supérieure pour recevoir le collier de l'élévateur et faciliter les manœuvres.

On utilise un acier très résistant = charge de rupture supérieure à 80 Kg /mm², pour la fabrication des masses-tiges. Les dimensions [diamètres] et poids des masses-tiges, ainsi que leurs filetages, sont normalisés.

Le tableau suivant donne les éléments de cette normalisation

APPELLATION NORMALISEE	DIAMETRE EXTERIEUR [POUCES]	DIAMETRE INTERIEUR [POUCES]	POIDS APPROXIMATIF [KG/M]
2 ³ / ₈ R	3 ¹ / ₈	1	33
3 ¹ / ₂ IF	4 ³ / ₄	2 ³ / ₈	64
4 ¹ / ₂ IF	6 ¹ / ₈	3 ¹ / ₄	97
5 ⁹ / ₁₆ IF	7 ³ / ₈	3 ³ / ₄	144
6 ⁵ / ₈ R	7 ³ / ₄	3 ¹ / ₂	180
8 ⁵ / ₈ R	10 ¹ / ₄	4 ¹ / ₄	320

La première colonne : appellation normalisée, correspond au type de filetage, en pouces et caractéristiques.

IF = Internal Flush, qui signifie que le diamètre intérieur est constant sur toute la pièce. Sans rétrécissement au droit des filetages.

R = Regular = diamètre intérieur réduit au droit des filetages.

Il existe d'autres séries, telles que : « Full hole », elles sont peu usitées en forages d'eau.

2.2. Les tiges [drill – pipes] : Le train de tiges, qui, dans la ligne de sonde, est situé au-dessus des masses – tiges, constitue l'arbre de transmission du mouvement de rotation de l'outil, ainsi que la canalisation qui amène la boue au fond du trou. Nous avons vu que le train de tiges doit être maintenu en tension sur toute la longueur, le point neutre, dans des conditions normales de travail, devant toujours se trouver en dessous, dans les masses – tiges.

L'une des préoccupations du foreur est donc de surveiller constamment le Martin – Decker et, connaissant, exactement, la composition de toute la ligne de sonde, de déterminer, par différence, la charge sur l'outil et la position du point neutre.

Si cette préoccupation n'était pas prise, le train de tiges « flamberait » et, n'étant plus rectiligne, viendrait battre les parois du trou, provoquant des éboulements et créant un important risque d'usure et de rupture.

Pour réduire donc ce risque, on choisit pour les tiges une relation entre leur diamètre et celui du trou, c'est-à-dire celui de l'outil.

La règle pratique est la suivante : la section de l'espace annulaire entre tiges et terrain doit être de 3 à 5 fois celle de l'intérieur des tiges.

Voir plus loin tableau pratique, basé sur cette règle, qui permet de choisir les tiges en fonction des outils.

Les tiges sont des tubes d'acier étiré sans soudure filetés mâles sur cônes aux deux extrémités. Elles ont, comme les masses – tiges, des longueurs unitaires de 6 mètres ou de 9 mètres environ.

Les tronçons sont raccordés entre eux par des manchons filetés coniques, mâle et femelle, et dénommés tool-joints [raccord d'outil]. Dans les appareils importants, pour accélérer les manœuvres, on les assemble en double ou en triple. Les tiges sont exécutées en acier dont les caractéristiques sont représentées par cinq grades : A, B, C, D, E, qui correspondent aux valeurs suivantes des limites élastiques, en kilogrammes par millimètre carré : 20, 28, 32, 39, et 53 kg/mm². Les tool – joints ont, en général, un diamètre supérieur au diamètre extérieur des tiges, c'est le cas des tiges « Regular », « Full hole » et « Internal Flush ».

Le diamètre intérieur des tool – joints « Regular » est inférieur au diamètre intérieur des tiges.

Les tool – joints « Full hole » et « Internal Flush » présentent un diamètre intérieur identique à celui des tiges, ce qui, d'une part réduit les pertes de charge du circuit de boue et permet, surtout, d'autre part, de descendre, à l'intérieur des tiges, des instruments spéciaux, tels que carottiers à câble, inclinomètres, coupe-tiges etc, qui ne risquent pas de se trouver arrêtés par changements de diamètre à chaque tool-joint.

2.2.1. Diamètres- Sections- Poids et Emplois des tiges

DIAMETRE NOMINAL EXTERIEUR [POUCES]	DIAMETRE EXTERIEUR [MILLIMETRES]	DIAMETRE INTERIEUR [MILLIMETRES]	SECTION D'ACIER [MILLIMETRES CARRES]	POIDS AU METRE [KILOGRAMMES]	DIAMETRE D'OUTIL A EMPLOYER
2 ³ / ₈	60.3	46.1	1170	9.3	Jusqu'à 4''
2 ⁷ / ₈	73.2	57.2	1630	12.9	4'' à 6''
3 ¹ / ₂	88.9	70.2	2320	18.3	6'' à 8 ¹ / ₂ ''
4 ¹ / ₂	114.3	97.2	2850	22.5	8 ¹ / ₂ '' à 12 ¹ / ₈ ''
6 ⁵ / ₈	168.3	146.3	5400	42.5	Plus de 12 ¹ / ₈ ''

2.2.2. Résistances des tiges

2.2.2.1. Torsion : Si l'outil se bloque dans le terrain, le foreur peut ne pas être averti immédiatement, le train de tiges subit une torsion excessive qui peut se traduire par l'une des conséquences suivantes :

- Si la limite élastique est dépassée, les tiges restent tordues en hélice et sont inutilisables, souvent, elles se déchirent, également en hélice.
- Si la limite élastique n'est pas atteinte, dès qu'on va libérer les tiges, elles se détendront en tournant brusquement en sens inverse, ce qui peut avoir pour effet un dévissage en un joint quelconque, moins bloqué que les autres. Il faudra tenter de « repêcher » celles qui seront laissées dans le trou, l'opération sera d'autant plus délicate que l'outil sera toujours « coince » au fond [ou ailleurs].

2.2.2.2. Traction : Il peut y avoir des efforts excessifs de traction, surtout si l'on tente de remonter une ligne de sonde bloquée dans le terrain.

Les tiges supérieures sont celles qui fatiguent le plus, il y aura intérêt, dans la constitution du train de tiges, de les changer de place, pour uniformiser leur degré de déformation permanente. En pratique, il convient de mettre en service suffisamment de masses-tiges pour que le train de tiges travaillerait uniquement à la traction.

Si un blocage se produit, la réaction du foreur de service est généralement la suivante : tirer au treuil pour tenter de remonter la ligne de sonde. Cette action est un réflexe naturel contre lequel il faut s'élever avec force, car il est presque toujours suivi d'une rupture de tige [Il ne faut jamais tirer à une valeur supérieure à la limite élastique]. En pratique ; il est bon de travailler avec des tiges de $2^{7/8}$, en grade C, la limite élastique est 32 Kg au millimètre carré, la section d'acier donnée par le tableau est de 1630 mm² :

Donc, il ne faut jamais tirer au-delà de :

$$32 \times 1630 = 52 \text{ tonnes}$$

Mais, on travaillera de telle façon que l'élément supérieur n'ait à supporter que :

$$52 \times 0.6 = 31 \text{ tonnes}$$

2.2.2.3. Entailles superficielles : Si l'on ne prend pas suffisamment de précautions, les mâchoires des clés de serrage ou des coins de retenue pénètrent dans le métal et y laissent des empreintes, plus ou moins profondes, qui constituent des amorces de rupture.

2.2.2.4. Fuites aux joints : Des joints insuffisamment serrés, des filetages de tool – joints fatigués peuvent provoquer des fuites parfois importantes qui, par érosion ou « siflage », risquent de rendre une ou deux tiges inutilisables. L'attention du foreur doit se porter sur le manomètre de pression de boue dont une chute brusque permet de se rendre compte du début de fuite.

2.2.2.5. Stockage et manutention des tiges [manipulation, emmagasinage, emballage et expédition] : Si les tiges sont stockées horizontalement sur parc, il faut veiller à ce qu'elles ne reposent pas seulement sur les deux extrémités, mais placer un ou deux supports intermédiaires.

Bien placer les protège – filets sur par cet sur chantier.

Brosser et graisser [graisse spéciale] tous les filetages, mâles et femelles, des tool – joints. La présence de terre ou de gravier dans les filets est une des causes les plus fréquentes de détérioration rapide.

2.2.2.6. Contrôles périodiques : Les ruptures de tiges sont tellement fréquentes en forage d'où la nécessité des recommandations indiquées plus haut, destinées à les éviter.

Les « instrumentations » tentatives de « repêchage », sont toujours aléatoires et très coûteuses.

Certains organismes spécialisés se chargent des vérifications périodiques sur les trains de tiges et de masses-tiges. Ces vérifications s'effectuent au magnafluxage (*Magnésie ;flux*) avec de la limaille (*parcelles de métal ; poudre*) qui se groupe aux endroits fissurés, même si les fissures sont très fines et invisibles à l'œil nu.

2.3. La tige carrée-Kelly : C'est une pièce unique dans la ligne de sonde. Elle est exécutée avec précision en usine et doit être traitée avec le plus grand soin pendant les manœuvres. Il est conseillé de vérifier fréquemment le filetage du raccord inférieur de la tige carrée ou de la kelly. En effet, s'il est avarié, il ne manquera pas d'abîmer successivement toutes les tiges qui viendront s'y raccorder. Il est bon d'ajouter un raccord supplémentaire dit « raccord d'usure » qui pourra être changé fréquemment.

V. LES FLUIDES DE CIRCULATION

1. La boue à la bentonite : En forage rotary, la boue de circulation peut être la meilleure ou la pire des choses. La meilleure parce que son indispensable utilité n'est, désormais, contestée par personne. La pire, car, si l'on n'est pas suffisamment instruit sur son rôle, sa composition, son comportement et son utilisation, elle peut provoquer de graves avaries : coincement, blocage de la ligne de sonde, entraînant parfois la perte totale de l'ouvrage et, pour le moins, constituant une considérable perte de temps.

En outre, si le « cake » (dépôt consolidant les parois du trou) est trop épais et trop adhérent, les venues d'eau des couches productrices peuvent se trouver sensiblement diminuées ou difficiles à détecter.

1.1. Rôle de la boue : Le circuit parcouru par la boue en forage rotary est le suivant :

- ✓ Refoulement de la pompe à boue, par tuyauterie rigide et par flexibles, jusqu'à la tête d'injection située au sommet de la ligne de sonde ;
- ✓ Circulation de haut en bas à l'intérieur de toute la ligne de sonde jusqu'à l'outil ;
- ✓ Circulation de bas en haut dans l'espace annulaire entre tiges et terrain ;
- ✓ Circulation dans les goulottes et les rigoles (canaux de décantation) jusqu'aux bacs ou aux fosses à boue, avec, s'il y a lieu, passage au tamis vibrant pour retirer les « cuttings ».
- ✓ Aspiration dans les bacs ou les fosses par la pompe à boue qui la refoule sur la ligne de sonde, etc

Les fonctions de la boue sont les suivantes :

- Consolider les parois du forage, par le dépôt du « cake » sur la formation ;
- Remonter au jour les sédiments broyés (cuttings) au fond par l'outil ;
- Maintenir les cuttings en suspension, s'il se produit un arrêt de circulation ;
- Lubrifier et refroidir les outils de forage ou de carottage ;
- Augmenter, par le jet à la sortie des événements de l'outil, l'action abrasive de celui-ci sur le terrain en cours de forage ;
- Faciliter et contrôler les opérations de mise en place du gravier additionnel et de cimentation
- Renseigner, par l'observation des variations de niveau dans les bacs ou fosses à boue, ou bien par celles de la pression au refoulement de la pompe, sur la nature du terrain découvert par l'outil et sur son potentiel aquifère ;
- Equilibrer les pressions hydrostatiques des couches aquifères rencontrées afin de juguler les jaillissements intempestifs des forages artésiens ;
- Enfin, en turboforage, entraîner la turbine au fond du trou.

1.2. Composition de la boue : C'est un mélange colloïdal, et non pas une solution, cette simple constatation donne une idée de l'instabilité de cette boue. Le produit de base est une variété d'argile, la bentonite, qui doit son nom à Fort Benton, localité des USA où elle fût découverte. C'est une roche argileuse, de densité 2.6, dont la consistance est voisine du kaolin. Très fine, la dimension des particules qui la composent est inférieure au micron, elle s'hydrate au passage de l'eau ou en présence d'un certain volume d'eau en formant des produits visqueux ou des masses gélatineuses, connues sous le nom de gels. Les changements de volume résultant de cette hydratation sont considérables. Le volume devient 12 à 15 fois, parfois 25 à 30 fois, plus grand. Un seul gramme de bentonite dispersé dans l'eau offre une surface de contact de l'ordre de plusieurs additifs pour le rendre compatible avec 4 à 5 mètres carrés. A ce mélange bentonite-eau, on ajoute un ou redonne à la boue ses propriétés initiales.

Dans le mélange bentonite-eau, on trouve :

- de l'eau absorbée, située à l'intérieur des particules de bentonite, dont la texture interne se modifie pour former le gel ;
- de l'eau adsorbée, fixée autour de chacune de ses particules et se déplaçant avec elle ;
- de l'eau libre, circulant librement indépendamment du déplacement des particules de bentonite.

Cette constatation est importante car elle explique pourquoi par essorage, ou par filtration, c'est surtout l'eau libre qui est évacuée, la majeure partie du mélange se déposant seule ou s'accumulant à la surface pour former le cake. Ainsi, la quantité de bentonite qui pénètre dans la formation, bien que trop souvent gênante,

se trouve-t-elle, de ce fait, sensiblement réduite. Il reste que sa présence peut occasionner quelques inconvénients dont nous reparlerons.

1.2. Contamination de la boue : Au départ, on prépare une boue dosée selon les besoins, puis on constate, au cours du forage, que la boue se charge de plus en plus des argiles du terrain et autres éléments détachés par l'outil au fond du trou.

Si l'on n'y prenait garde, la boue, ainsi contaminée, serait rapidement inutilisable. Non seulement elle perdrait la plupart de ses propriétés, mais, si on la laissait en circuit, elle accumulerait au fond du trou une masse compacte de matériaux qui finiraient par bloquer complètement l'outil, d'où : coincement, instrumentation et risque de perdre l'ouvrage. Les sédiments fins (inférieurs à 70 microns) peuvent provoquer la coagulation de boue et augmenter dangereusement sa viscosité.

En outre, certains sels des terrains (gypse par exemple) provoquent la floculation de la boue à la bentonite et l'on aura intérêt, dans ces terrains, à employer une boue à l'huile émulsionnée.

Toutes les réactions qui gouvernent les suspensions colloïdales sont des réactions d'équilibre, elles comportent des limites en dehors desquelles le mélange change complètement d'aspect.

1.4. Les remèdes : On donnera plus loin des tableaux qui indiquent, dans la plupart des cas, les moyens et la nature des additifs à employer pour redonner à la boue des caractéristiques convenant à la composition du terrain en cours de forage.

1.5. Les spécialistes : Il est utile de signaler qu'il existe des entreprises de services spécialisées dans l'étude et la préparation des boues de forage. Pour les ouvrages profonds ou présentant des difficultés particulières, il est prudent de faire appel à ces entreprises qui préconiseront la composition à donner à la boue au début de forage et les modifications à y apporter au fur et à mesure de l'approfondissement, du changement de terrain et de la pression hydrostatique des nappes.

1.6. Caractéristiques physiques et chimiques de la boue à la bentonite :

1.6.1. Densité : C'est une donnée essentielle. Une boue dense favorise l'ascension dans l'espace annulaire des sédiments détachés par l'outil au fond du trou, elle permet ainsi d'équilibrer la pression d'une eau artésienne rencontrée dans une nappe productive et de poursuivre le forage sans être gêné par le jaillissement en surface.

1.6.2. Viscosité : Une boue trop visqueuse devient difficile à pomper, une boue trop fluide risque de se dissocier et perd ses propriétés de consolidation des parois.

1.6.3. Thixotropie : C'est la faculté, pour un mélange à base de produits en suspension, de passer d'une consistance rigide, sorte de gel, à un aspect fluide, lorsqu'on le brasse énergiquement, puis de reprendre son état initial si on cesse l'agitation, d'où la nécessité de maintenir constamment la circulation dans un forage, même si, pour une raison quelconque, la ligne de sonde ne tourne pas.

1.6.4. Filtrat : C'est ce qui passe à travers d'un filtre ; en majeure partie, il s'agit de l'eau libre. Si le filtrat est trop grand, des éboulements des parois sont à redouter ; s'il est trop faible, la boue risque de colmater exagérément de faibles venues d'eau.

1.6.5. Cake : C'est ce qui est retenu par le filtre (ou ici par le terrain). Il joue en sens inverse du filtrat : trop faible, il ne tient pas suffisamment les parois ; trop épais, il risque de colmater les formations aquifères.

1.6.6. Teneur en sable : La boue à tendance à se charger exagérément de sable provenant du terrain. Le sable est dangereux pour les parties en mouvement des pompes à boue qu'il érode rapidement.

1.6.7. pH : Le contrôle de l'acidité et de l'alcalinité de la boue est important, il révèle la contamination par le ciment ou par l'eau de la couche aquifère si sa valeur est supérieure à 10 ou 11.

Par contre, s'il est inférieur à 7, boue acide, les risques de floculation sont à redouter.

Pour chacun de ces critères, le tableau « conditionnement de la boue à la bentonite » donne :

- Les valeurs moyennes à maintenir,
- Les moyens et appareils à employer pour les mesurer,
- Les indications procurées par ces mesures,
- Les remèdes à employer.

Les renseignements fournis par ce tableau seront utiles aux foreurs et leur permettront d'éviter des incidents causés par la boue dans plupart des cas.

1.7. Laboratoire de chantier :

Chaque chantier rotary doit être doté d'un petit laboratoire qui tient tout entier dans une armoire métallique ayant approximativement les dimensions suivantes :

Hauteur.....0,80 m

Largeur.....0,60 m

Profondeur.....0,40 m

Cette armoire doit se trouver obligatoirement à proximité du foreur, si possible sur la plate-forme de l'appareil.

Elle contient notamment les instruments suivants, tous simples et robustes :

- Presse BAROID (filtrat et cake)
- Entonnoir de MARSH (viscosité)
- Appareil BAROID (teneur en sable)
- Colorimétrie (pH)

1.8. Préparation de la boue : Le dosage varie entre 3 et 8% de bentonite, soit 30 à 80 Kg de produit, par mètre cube d'eau. La densité initiale moyenne est de l'ordre de 1,10.

CONDITIONNEMENT DE LA BOUE A LA BENTONITE

Objet des mesures Valeurs normales	Appareils à employer	Interprétation des résultats Conséquences	Remèdes et corrections à employer Additifs
Densité moyenne 1.20	Balance BAROID (à fléau)	Trop forte : risque de perte de boue cake trop épais	Dilution par l'eau en contrôlant les autres caractéristiques, brasser énergiquement à la mitrailleuse
		Trop faible : Cake trop mince, risque de dégradation des parois, éboulement, éruptions si artésianisme	Ajouter bentonite (densité 2.6) ou baryte (densité 4.3) Brasser
Viscosité Moyenne 40 à 45 secondes MARSH	Viscosimètre MARSH (entonnoir - chantier) Viscosimètre (laboratoire) donne aussi le gel à 10 minutes	Trop forte : difficulté de compage, risques de coincements pendant les arrêts de circulation	Emploi de pyrophosphate (4 Kg pour 100 litres d'eau), de tanins, de lignites, ligno – phosphates. Attention au pH
		Trop faible : risque de perte de boue et de coincement par séparation des éléments constitutifs de la boue	Ajouter de la bentonite, de l'amidon ou de la fécule
Filtrat 5 à 10 cm3 Cake 6/32''=5 mm (maximum)	Filtre – presse BAROID	Filtrat trop grand= Cake trop mince, risque d'éboulement et de pertes de boue	Ajouter Amidon, fécule ou, mieux, CMC (blanose – Carboxyméthyl – Cellulose – Cellulose colloïdale) 3 à 10 Kg par m3 de boue Mixer - Brasser
		Filtrat trop faible= Cake trop épais, Risque d'aveuglement des venues d'eau	Dilution par l'eau. Contrôler les autres caractéristiques. Brasser à la mitrailleuse
Sable	Tamis BAROID	Risque d'usure, par érosion, des pompes à boue	Employer les déssableurs à cyclones
pH 7 à 9.5	Papiers colorimétriques	PH > 11= contamination par le ciment ou par l'eau de la formation PH < 7= excès d'acidité, risque de floculation.	Employer les polyphosphates acides si pH > 11 Ou neutres si pH < 7