

FLUIDES POUR FORAGES HORIZONTAUX DIRIGES



LES GARANTIES DU SUCCES:

- Obtenir des informations fiables sur la géologie du projet
- Anticiper les caractéristiques du fluide en fonction :
 - ✓ De l'étude de sol
 - ✓ Du programme de forage
 - ✓ Des contraintes environnementales et logistiques

1 - GENERALITES

La Technique du forage horizontal dirigé (F.H.D.) dérive de celle du forage pétrolier.

Elle autorise la pose de câbles, fourreaux, canalisations, dans le sous sol, sans ouverture de tranchée.

Elle trouve notamment son application:

- lors de la traversée d'obstacles particuliers tels que routes et autoroutes, rivières et canaux, voies
- ferrées, pistes d'aérodrome
- en site urbain, pour les travaux sous voirie.

Cette technique apporte gain de temps et réduction des nuisances.

Dimensions indicatives d'un tir:

- Longueur : jusqu'à 1600 m
- Diamètre : jusqu'à 1,80 m

2 - PRINCIPE D'EXECUTION D'UN F.H.D.

Un FHD est réalisé en 3 étapes :

2-1 Forage pilote

Un forage pilote est réalisé par rotation et fonçage d'un train de tiges.

La tête de forage est équipée d'un patin dont l'orientation permet de modifier, par poussée simple, le cap du forage.

Elle est munie d'une sonde émettrice qui transmet à un capteur de surface les éléments permettant de la positionner et donc de rectifier, le cas échéant, le cap.

Elle est munie de buses d'injection de boue de forage.

Le diamètre d'un trou pilote est généralement de 50 à 150 mm.

2-2 Alésage(s)

Le forage pilote s'achève au niveau du "puits de sortie".

La tête de forage est alors remplacée par un aléreur, également muni de buses d'injection de boue.

Le forage est alors alésé par rotation et traction, jusqu' au puits d'entrée.

Plusieurs phases d'alésage peuvent être nécessaires.

2-3 Equipement

Lors de la dernière phase d'alésage, le fourreau ou la canalisation à mettre en place est attachée derrière l'aléreur et tractée jusqu'au puits d'entrée.

3 - ROLES DE LA BOUE DE FORAGE DANS UN F.H.D.

Préambule : Les F.H.D. sont généralement exécutés sous boue bentonitique, dont le rôle et les propriétés sont décrits ci après. On évoque, chapitre 6, le cas des boues aux polymères et la mousse.

Le rôle de la boue de forage est fondamental pour la bonne réalisation d'un F.H.D. Ses principales fonctions sont les suivantes :

3-1 Participation au forage

La boue, injectée sous forte pression, (de 30 à 150 bars) participe par " jetting " , à la destruction du terrain.

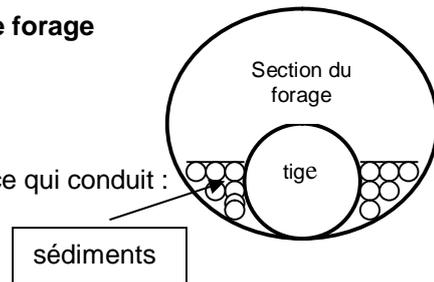
3-2 Evacuation et maintien en suspension des résidus de forage

Dans un forage horizontal, la sédimentation des déblais tend à affecter un segment situé à la base de la section du forage.

La tige de forage que la gravité excentre, tend elle même à se positionner dans la même zone de la section.

Le nettoyage du trou est donc plus difficile dans cette zone, ce qui conduit :

- A l'augmentation des frottements et du couple de forage
- Au ralentissement du forage
- Au risque de coincement du train de tiges



La fonction " nettoyage " de la boue est donc fondamentale, et son efficacité dépend principalement de 2 paramètres :

- la vitesse de circulation de la boue dans l'annulaire
- la capacité à ralentir ou empêcher la sédimentation des déblais

→ La vitesse de la boue dans l'annulaire est principalement liée au débit de la pompe de circulation, mais aussi, en régime d'écoulement laminaire, à ses caractéristiques rhéologiques, présentées dans le chapitre suivant. A titre indicatif, une **vitesse de circulation dans l'annulaire de 30 m/mn garantit un bon nettoyage**. En régime turbulent, les caractéristiques rhéologiques ont peu d'importance.

→ La capacité à ralentir ou empêcher la sédimentation est particulièrement importante dans le cas où la vitesse de circulation de la boue est faible, voire nulle. Dans un tel cas, la recherche de caractéristiques rhéologiques adaptées est primordiale.

3-3 Lubrification

Dans un FHD, la surface de contact entre parois du forage et train de tige ou canalisation à mettre en place est considérable. Il en résulte des frottements importants et donc une résistance au mouvement. La vitesse d'avancement est donc réduite. Il est souvent difficile d'en déterminer la cause exacte: présence de débris, effondrements, fluage, mauvaise géométrie .

Dans la plupart des cas, l'emploi de fluides de forage possédant de bonnes propriétés lubrifiantes tels que les systèmes à base de bentonite (éventuellement adjuvants) favorise la diminution des frottements.

On conçoit par ailleurs que la lubrification est d'autant mieux assurée que la boue contient peu de solides (boue bien dessablée) et qu'elle génère un cake fin.

3-4 Refroidissement de l'outil de forage

En plus du refroidissement de l'outil, la boue protège la sonde de détection de l'échauffement.

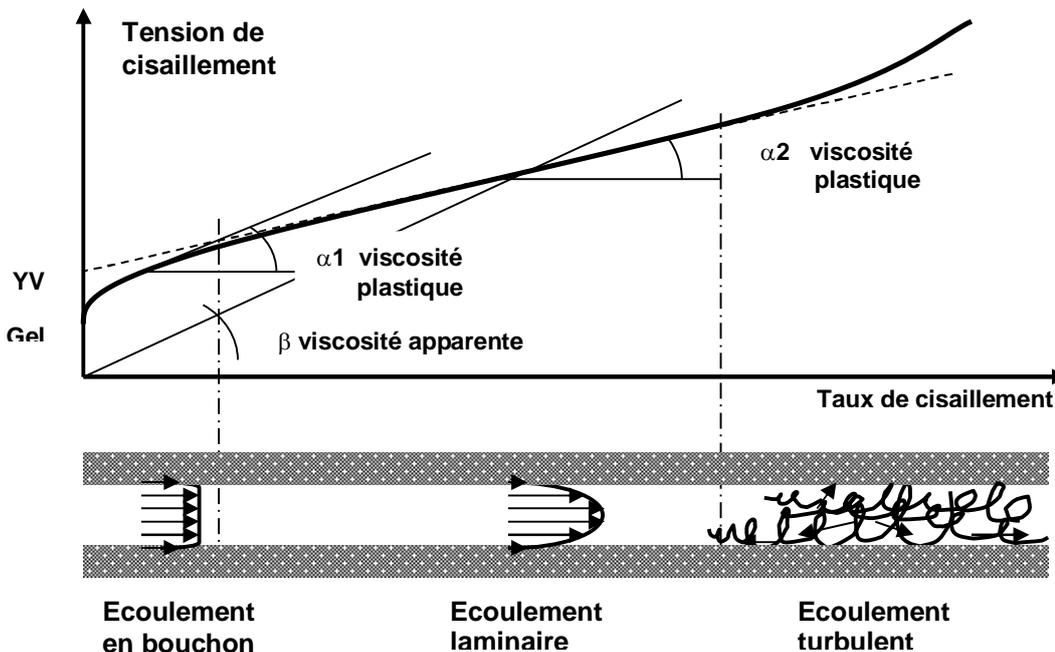
3-5 Participation à la stabilité du trou

Par application d'une légère pression hydrostatique, la boue participe à la stabilité des parois du forage. En terrain peu perméable (sables fins), la boue génère sur la paroi du forage un cake fin et imperméable (cake dit "externe" qui autorise l'application de cette pression. En terrain plus perméable (sables grossiers), la boue pénètre légèrement la formation, mais s'immobilise grâce à sa rhéologie particulière ; on parle alors de "cake interne", sur lequel la pression hydrostatique peut s'appliquer. En cas de perte de circulation, la boue peut constituer un vecteur pour produits colmatant.

4 - RAPPEL DE NOTIONS DE RHEOLOGIE APPLIQUEE AUX BOUES DE FORAGE

Les notions de Viscosité Plastique (VP) , Viscosité Apparente (VA) , "Yield Value" (YV) et Gels communément associés à la limite d'écoulement, sont employées couramment dans la littérature concernant les boues forages. Elles définissent parfaitement le comportement d'un fluide à base de bentonite en écoulement et au repos, et sont utiles pour caractériser le fluide de forage d'un F.H.D. Une présentation qualitative en est donnée ci dessous.

Le graphique ci dessous, appelé Rhéogramme, représente le comportement d'un fluide, dans diverses circonstances, c'est à dire dans les différentes parties du circuit de boue.



→ L'axe des abscisses représente le "taux de cisaillement" .

En réalité, il s'agit d'un " gradient de vitesse " (rapport d'une vitesse à une distance) mais pratiquement, on peut considérer que cette grandeur est linéairement proportionnelle à la **vitesse de circulation du fluide**, qui lui est imprimée par une pompe ou par une charge quelconque, ou bien, dans le cas d'une mesure au Viscosimètre FANN, à la **vitesse de rotation du rotor**.

→ **L'axe des ordonnées représente la "tension de cisaillement".**

On peut considérer qu'elle caractérise la "difficulté" qu'a un fluide à s'écouler lorsqu'il est soumis à une force, telle que celle transmise par une pompe; elle est donc exprimée en terme de "contrainte" traduisant la "résistance" à l'écoulement.

→ **Viscosité Plastique (VP)**

C'est le rapport de la tension de cisaillement au taux de cisaillement. Elle est donc représentée par la **pente** de la courbe tracée en gras.

Elle caractérise donc bien, pour chaque vitesse, la résistance à l'écoulement.

On observe qu'elle n'est pas constante.

Notamment, elle est élevée pour des vitesses très faibles, (zone d'écoulement en "bouchon"), puis elle décroît et tend à se stabiliser à une valeur constante tant que l'écoulement reste laminaire. C'est cette valeur constante de la VP qui caractérise une boue bentonitique.

La valeur de VP (en cp), mesurée au Viscosimètre FANN, est :

$$\text{VP} = \text{Lecture à 600 rpm} - \text{Lecture à 300 rpm}$$

Une VP faible facilite la circulation de la boue dans le train de tige et au niveau de l'outil (diminution des pertes de charge).

→ **Viscosité Apparente (VA)**

Comme le montre le graphique ci dessus , il s'agit aussi d'une grandeur de type "viscosité" puisque c'est un rapport Tension de cisaillement / Taux de cisaillement. Par définition, pour les boues de forage, c'est la valeur de la pente de la droite qui relie l'origine à tout point du rhéogramme. La viscosité apparente mesurée au viscosimètre FANN est la valeur correspondante à 600 rpm.

Sans donner une idée précise sur son comportement rhéologique, elle ne représente, comme la viscosité Marsh, qu' un **indicateur** simple de la viscosité.

La valeur de VA (en cp) mesurée au Viscosimètre Fann, est :

$$\text{VA} = \text{Lecture Fann à 600 rpm} / 2$$

→ **Gel 0 , Gel 10 et YV**

Le graphique met en évidence sur l'axe des ordonnées ces valeurs qui correspondent toutes à des contraintes.

Gel 0 et Gel 10 signifient qu' au repos, c'est à dire sous vitesse nulle, la boue forme un gel et présente une résistance à l'écoulement.

Le Gel 0 caractérise une boue dont le mouvement vient de cesser. On le mesure avec le Viscosimètre FANN, et on l'exprime en Pascal (Pa) ou en Livres / 100 pieds²

Le Gel 10 caractérise la boue après un repos de 10 minutes. Il s'exprime comme le gel 0 et lui est généralement supérieur, ce qui traduit la capacité qu'a la bentonite à ré-édifier sa structure après un temps donné (phénomène réversible appelé thixotropie).

L'existence de Gel 0 et de Gel 10 présente 2 avantages pour les fluides de forage :

- Ils empêchent l'écoulement, donc les infiltrations, dans les terrains poreux et finement fissurés.
- Ils empêchent, au repos, la sédimentation d'une grande partie des résidus de forage.
- YV est une valeur approchée de la limite d'écoulement réelle déterminée géométriquement (intersection à l'ordonnée de la partie linéaire du Rhéogramme

La valeur de YV (en livres / 100 pieds²) se calcule à partir des mesures de VP et de VA est :

$$YV = (VA - VP) * 2$$

Avec l'expérience, l'interprétation des valeurs des gels et de YV permet d'estimer la capacité de la boue à assurer sa fonction de nettoyage et de stabilité du forage.

On trouvera dans le chapitre suivant, les valeurs que doivent présenter ces caractéristiques pour la bonne exécution d'un F.H.D.

5 - SELECTION D' UN FLUIDE DE FORAGE POUR F.H.D.

La sélection d'un fluide résulte de la prise en compte simultanée des exigences suivantes:

- Aptitude à transporter et à maintenir les déblais en suspension
- Aptitude à soutenir les formations mal consolidées
- Aptitude à lubrifier
- Traitement des rejets

5 - 1 Aptitude à transporter et à maintenir les déblais en suspension

→ Calculer la vitesse de circulation du fluide dans l'annulaire pour chaque phase de circulation:

$$V \text{ (m/mn)} = \frac{\text{Débit pompe (m}^3\text{/mn)}}{\text{(Section trou - Section tige) (m}^2\text{)}}$$

Ou bien $V \text{ m/mn} = \frac{\text{Débit pompe (l / mn)}}{V \text{ annulaire (l / m)}}$

→ Si $V > 30 \text{ m/mn}$, le transport des déblais devrait être correctement assuré. Une boue bentonitique de viscosité Marsh voisine de 40 sec. peut convenir.

→ Si $V < 30 \text{ m/mn}$, il y a lieu de prendre les précautions pour ralentir voire arrêter la sédimentation des déblais, tout en conservant une viscosité plastique aussi basse que possible. On recherche donc, pour une viscosité **Marsh >50 "** et/ou une **VA > 25 cp** :

On recommande en général : **VP faible** et **YV élevé**

Notamment : $YV \text{ (livres / 100 pieds}^2\text{)} / VP \text{ (cp)} > 2$

5 - 2 Aptitude à soutenir les formations mal consolidées

Les valeurs suivantes peuvent être prises comme guide, pour des boues de circulation .

$$\text{Filtrat} < 25 \text{ ml}$$

et

$$YV \text{ (livres / 100 pieds}^2\text{)} > 25$$

5 - 3 Aptitude à lubrifier

Maintenir , pour la boue injectée, la teneur en sable aussi faible que possible et un faible filtrat pour assurer un cake fin, étanche et plastique.

Indication : **Teneur sable < 3%** et **Filtrat < 25 ml**

Les propriétés rhéologiques, de filtration, de stabilité et le pouvoir lubrifiant des boues de forages peuvent être améliorées par adjonction d'additifs de type :

- **SC Mud P ou L**: Polymère de synthèse Viscosifiant et stabilisant des argiles (1 à 4 kg/m³)
- **SC Vis HV ou LV**: Polymères cellulosiques Réducteur de filtrat, existe en grade HV et LV (haute et basse viscosité 1 à 3 kg/m³)
- **SC Lub et SC EP20** : Lubrifiant et réducteur d'usure (1 à 5 litres/m³)
- **Bentocryl 86** : Puissant fluidifiant et dispersant (1 à 2 litres/m³)

5 - 4 Traitement des rejets

En complément de la sélection du fluide, il convient d'étudier le besoin en matériel de fabrication et de traitement des boues de manière à rejeter volume minimum, et d'anticiper la meilleure filière de traitement .

6 - CAS DES BOUES AU POLYMERE ET DES MOUSSES

Les fluides à base de bentonite sont les plus largement utilisés pour la réalisation des F.H.D.: En effet, ils permettent d'apporter une réponse à la majorité des problèmes spécifiques à ce type de travaux .

Cependant, des conditions particulières peuvent conduire à l'utilisation de fluides d'un autre type :
Notamment :

Pour le forage de roches dures au marteau fond de trou, pour lesquels seule la fonction nettoyage est requise, l'utilisation de mousse stabilisée, diminue de manière significative la quantité d'air nécessaire pour le forage.

A titre indicatif :

Forage au marteau fond de trou	Vitesse de circulation recherchée dans l'espace annulaire
A l'air seul	> 1000 m / mn
A la mousse	> 60 m / mn

Par ailleurs, dans le cas particuliers tels que:

- forage dans des zones stables
- forage de drains pour lesquels le retour de perméabilité est indispensable
- forage d'argile collante
- limitation indispensable des rejets de boue

L'utilisation de polymères hydrosolubles dégradables **SC Vis ou SC Gum ou SC Xgum** augmente la stabilité et l'efficacité des mousses.

7 - EXEMPLES DE FORMULATIONS

7 - 1 Le tableau ci dessous propose des formulations indicatives de boues bentonitiques à partir de différentes qualités.

Qualités de bentonites CLARIANT	Bentonil® THR Kg/m3	Bentonil® XR Kg/m3	Bentonil® HDG Kg/m3
Pour une MFV de 50 sec.	40 - 45	35 - 40	30 - 35
Pour une MFV de 70 sec.	50 - 55	40 - 45	35 - 40

7 - 2 Le tableau ci dessous propose des formulations indicatives de mousse :

Technique	Composition du fluide
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mousse pour marteau fond de trou: <p>Taux d' injection : 1 à 2 litres du mélange ci contre par m3 d'air injecté / minute</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mousse pour forage rotary: <p>Taux d' injection : 2 à 5 litres du mélange ci contre par m3 d'air injecté / minute</p>	<p>Eau : 1000 litres SC Mud L : 1 à 2 litres SC Foam : 10 à 20 litres</p> <p>Destruction: Il est possible d'accélérer la destruction de la boue par vaporisation d'un brouillard d'eau.</p>