



CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES ET COMPOSITION DES BOUES DE FORAGE

Communication présentée au
Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France
le 20 mars 1970

PAR M^{lle} M. MARTIN *

1. — Introduction

Un des principaux rôles des boues de forage est de remonter les déblais du fond du puits à la surface. La consistance de la boue doit donc être suffisante pour empêcher une sédimentation de ces déblais dans le courant ascensionnel. Mais cette consistance ne doit pas dépasser certaines limites qui deviendraient incompatibles avec la puissance des installations de pompage et empêcheraient la séparation des déblais, après chaque cycle, dans les séparateurs de surface.

Egalement, lors des arrêts de circulation pour manœuvres, les déblais et particules solides dispersés doivent rester parfaitement en suspension. Ceci implique aussi certaines propriétés rhéologiques qui, toutefois, ne doivent pas entraver la remise en circulation ni gêner les manœuvres ou avoir d'influences néfastes au cours de celles-ci (surpressions lors de la descente des tiges ou dépressions lors de la remontée).

L'ajustement et le contrôle des caractéristiques rhéologiques vont donc jouer un rôle primordial dans la technique des boues de forage. Toute modification importante de ces caractéristiques, signe d'une évolution du fluide, sera immédiatement combattue. Les propriétés souhaitées seront obtenues, en début d'utilisation, grâce à un choix convenable de la composition, compte tenu d'un certain nombre de facteurs imposés tels que : origine du fluide de base (eau douce ou eau de mer), nature des terrains traversés, température et pression atteintes dans le puits. En cours de forage, les traitements consisteront à modifier plus ou moins la composition de départ par addition de produits choisis selon l'origine de l'évolution.

2. — Rappels sur la composition des boues de forage

Dans la pratique, par suite des nombreux rôles joués par la boue de forage et des impératifs souvent contradictoires qui imposent les différentes propriétés, le choix de la composition permettra d'obtenir un compromis entre les caractéristiques souhaitables.

A l'origine, la boue de forage était simplement formée par la dispersion dans l'eau, des débris du terrain et contenait donc une certaine proportion d'argile. Puis, au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de puits à forer et de la diversification des conditions de forage, est apparue la nécessité d'utiliser des boues plus élaborées. C'est ainsi, par exemple, qu'on constate certaines évolutions dans la technique des boues à base d'eau et d'argile, celles-ci devant résister à des températures de plus en plus élevées dans des forages de plus en plus profonds. De même, dans des cas particuliers, l'emploi d'une boue à base d'huile peut être préféré. Récemment encore, une nouvelle boue à base d'eau et, non plus d'argile, mais de polymère a été proposée et semble obtenir une certaine faveur sur les chantiers de forage.

Nous ne considérerons pas ici le cas particulier des boues « allégées » contenant un gaz en émulsion. Nous ne donnerons qu'une description sommaire de la composition des boues à base d'eau et d'argile, des boues à base d'eau et de polymère et des boues à base d'huile.

2.1 Boue à base d'eau et d'argile.

Elle comprend :

- l'eau
- l'argile; le plus souvent, pour la préparation de la boue, on utilise une bentonite dite « activée » avec une proportion importante de bentonite sodique.

* Ingénieur à la division Production, Institut français du Pétrole.

Dans certaines conditions particulières, on utilise une sépiolite.

- le réducteur de viscosité, (ou dispersant), qui permet d'ajuster les caractéristiques rhéologiques. Suivant les conditions, il peut s'agir d'un réducteur minéral (phosphate) ou d'un réducteur organique (tanins, dérivés de la lignite ou de la lignine). Depuis quelques années, les lignosulfonates de ferrocrome ont trouvé un emploi dans ce domaine;
- le réducteur de filtrat, (polymère dispersible dans l'eau), tel que l'amidon ou un dérivé de la cellulose (le plus souvent la carboxyméthylcellulose) qui minimise la filtration de l'eau de la boue dans les terrains traversés;
- l'alourdissant, poudre minérale de densité élevée (carbonate de calcium, sulfate de baryum, par exemple) qui donne à la boue la densité voulue;
- des produits chimiques divers tels que la soude, la chaux...

2.2 Boues à base d'eau et de polymère.

Ce type de boue a été récemment introduit et n'en est encore qu'à ses débuts. L'argile est remplacée par un « biopolymère » provenant de l'action de bactéries sur des carbohydrates. L'addition à la suspension de chlorure chromique provoque une réticulation des chaînes de polymère. Les caractéristiques du fluide obtenu peuvent être ajustées, pour l'utilisation comme boue de forage, grâce à des matériaux tels que carboxyméthylcellulose, amidon, lignosulfonate de ferrocrome, bentonite, alourdissant.

2.3 Boues à base d'huile.

Il existe deux types de boues à l'huile :

- a) Les boues ne contenant qu'une phase liquide, l'huile, dans laquelle sont dispersés divers produits (asphalte, polymères, argile organophile...) et l'alourdissant, si nécessaire.
- b) Les boues émulsionnées où, dans la phase continue huile, sont dispersées des gouttelettes d'eau. La formation et la stabilité de l'émulsion sont assurées par différents agents appropriés. Dans cette émulsion est ajouté l'alourdissant, si nécessaire.

3. — Rhéologie des boues de forage

Il s'est répandu dans le domaine de la rhéologie des boues de forage un certain nombre de notions simplificatrices qui, si elles sont exactes dans quelques cas, risquent de conduire à des erreurs importantes dans d'autres. Nous essaierons d'apporter ici quelques données plus rigoureuses.

Les boues de forage sont des fluides non newtoniens, le plus souvent thixotropes.

3.1 Classification rhéologique.

Suivant la composition, elles peuvent être visqueuses, viscoplastiques ou encore, légèrement viscoélastiques.

Si dans une boue à base d'argile, la teneur en haut polymère réducteur de filtrat est faible, la boue est visqueuse. Si la teneur en réducteur de viscosité est faible, la boue est viscoplastique et présente un seuil de cisaillement.

Si la boue, au contraire, contient une concentration en haut polymère élevée par rapport à la concentration en

solide, la boue a les propriétés de la suspension du polymère et peut être légèrement viscoélastique.

Du point de vue pratique, cette distinction n'est pas considérée. Ce qui importe surtout, c'est le comportement du fluide en régime permanent.

3.2 Caractéristiques rhéologiques en régime permanent.

Les caractéristiques rhéologiques des boues de forage sont déduites de mesures effectuées dans des viscosimètres rotatifs, le plus souvent à cylindres coaxiaux, ou des viscosimètres capillaires.

3.2.1 Relation tension tangentielle de cisaillement - vitesse de déformation

Nous ne nous intéresserons ici qu'à la relation tension tangentielle-vitesse de déformation. On a longtemps admis que les boues de forage étaient des fluides viscoplastiques répondant à la loi de Bingham. Ceci est exact si la boue est constituée d'une suspension de bentonite dans l'eau, sans autre additif. Mais, il est bien évident que l'addition de produits divers tels que réducteurs de viscosité et réducteurs de filtrat modifie la structure de la suspension et ses caractéristiques d'écoulement.

Depuis quelques années, une nouvelle tendance considère parfois les boues de forage comme des fluides répondant à la loi en puissance. Si cette notion se vérifie souvent dans un petit domaine de vitesses de déformation, elle ne peut être généralisée et étendue à un domaine plus large variant, par exemple, de 1 à 10³ ou 10⁴.

A la suite de nombreuses mesures, nous avons pu conclure que, pour la plupart des boues de forage, la courbe d'écoulement pouvait être caractérisée par une équation de la forme [1] :

$$\tau = \eta_{\infty} \dot{\gamma} \left(1 + \frac{\tau_{\infty}}{m \eta_{\infty} \dot{\gamma}} \right)^m \quad (1)$$

τ : tension de cisaillement;

$\dot{\gamma}$: vitesse de déformation.

m , τ_{∞} et η_{∞} sont caractéristiques du fluide :

m nombre sans dimension peut varier entre 0 et 1;

τ_{∞} a les dimensions d'une tension;

η_{∞} a les dimensions d'une viscosité.

Si $m = 0$, τ_{∞}/m gardant une valeur finie, on retrouve l'équation de Newton.

Si $m = 1$, on retrouve l'équation de Bingham.

Si $\dot{\gamma}$ tend vers 0, l'équation peut s'écrire :

$$\tau = \eta_{\infty} \left(\frac{\tau_{\infty}}{m \eta_{\infty}} \right)^m \dot{\gamma}^{1-m} \quad (2)$$

On retrouve la loi en puissance d'Ostwald :

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

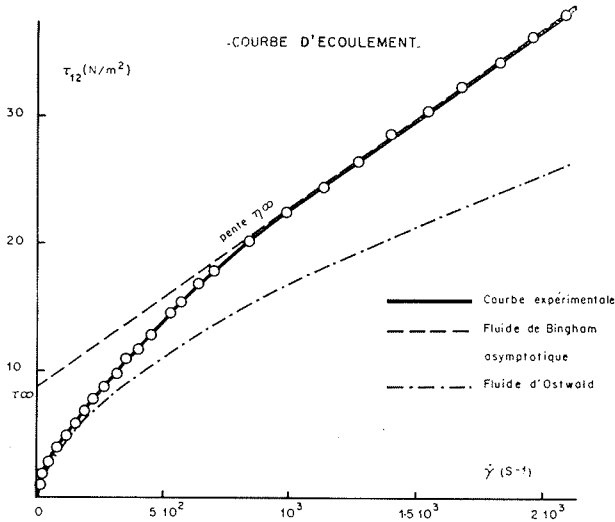
avec $n = 1 - m$.

Si $\dot{\gamma}$ tend vers l'infini, on a alors :

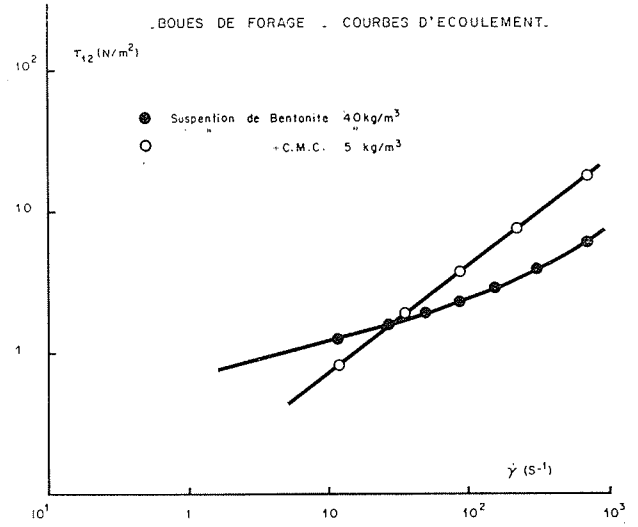
$$\tau = \eta_{\infty} \dot{\gamma} \left(1 + \frac{\tau_{\infty}}{\eta_{\infty} \dot{\gamma}} \right) \quad (4)$$

Cette relation caractérise la courbe d'écoulement d'un fluide de Bingham de viscosité plastique η_{∞} et de seuil de cisaillement τ_{∞} . Ce fluide est le fluide de Bingham asymptotique au fluide considéré.

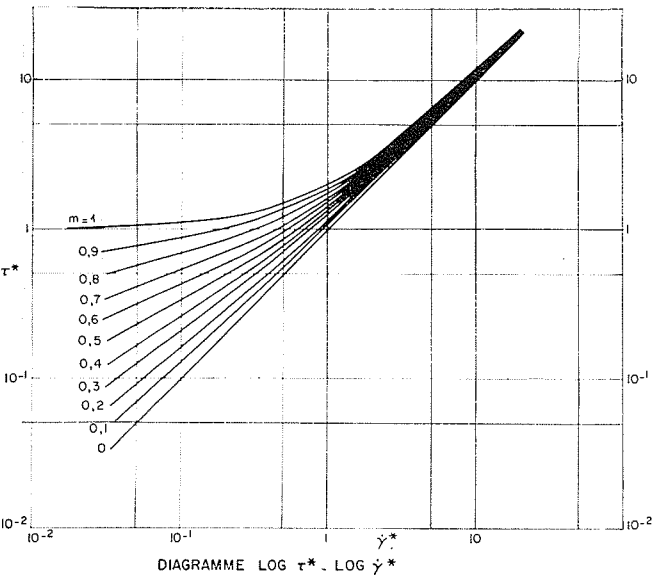
La figure 1 donne, en coordonnées cartésiennes, un



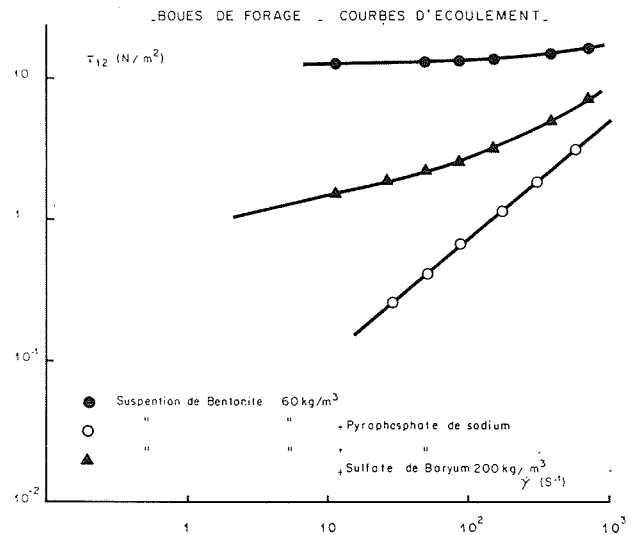
1/



3/



2/



4/

exemple de courbe d'écoulement répondant à l'équation (1). Dans ce cas, on a :

$$\begin{aligned}
 m &= 0,4 \\
 \tau_{\infty} &= 8,8 \text{ newtons/m}^2 \\
 \eta_{\infty} &= 0,014 \text{ poiseuille}
 \end{aligned}$$

L'équation (1) peut être mise sous une forme non dimensionnelle avec :

$$\dot{\gamma}^* = \frac{\eta_{\infty} \dot{\gamma}}{\tau_{\infty} / m} \quad (5)$$

$$\tau^* = \frac{\tau}{\tau_{\infty} / m} \quad (6)$$

D'où :

$$\tau^* = \dot{\gamma}^* \left(1 + \frac{1}{\dot{\gamma}^*} \right)^m$$

Cette relation est représentée, pour chaque valeur de m , en coordonnées logarithmiques, par les courbes de la figure 2. Ce diagramme permet de calculer, à partir de

courbes expérimentales les valeurs des caractéristiques m , τ_{∞} , η_{∞} .

3.2.2 Variations des caractéristiques rhéologiques avec la composition

Le tableau 1 donne des exemples de caractéristiques rhéologiques obtenues pour différentes boues préparées au laboratoire. Ces valeurs ont été obtenues à la température ambiante. Les figures 3, 4 et 5 présentent, en coordonnées logarithmiques, quelques courbes d'écoulement correspondantes.

Pour certaines compositions, le cas limite où la courbe d'écoulement peut être caractérisée par la loi en puissance est atteint; n ne semble pas alors prendre de valeurs inférieures à 0,7. Pour les fluides répondant à l'équation à trois paramètres, m peut varier de manière assez large entre 0 et 1.

On note que l'addition de réducteur de viscosité diminue le paramètre m et tend à donner un fluide répondant à la loi d'Ostwald. Il en est de même pour l'addition de réducteur de filtrat (C.M.C.). Par contre, l'addition de solides

Paramètres rhéologiques de différentes boues de forage

Tableau 1

COMPOSITION DE LA SUSPENSION	m	τ_{∞} (N/m ²)	η^z (PI)	n	K (M.K.S.)
Bentonite 40 kg/m ³	0,75	2,6	0,0052	—	—
Bentonite + 1 kg/m ³ CMC	0,6	0,75	0,0067	—	—
Bentonite + 2 kg/m ³ CMC	—	—	—	0,72	0,083
Bentonite + 5 kg/m ³ CMC	—	—	—	0,77	0,127
Bentonite + 10 kg/m ³ CMC	—	—	—	0,85	0,183
Bentonite 60 kg/m ³	1	12,6	0,004	—	—
Bentonite + phosphate de sodium	—	—	—	0,83	0,016
Bentonite 60 kg/m ³ + phosphate + 100 kg/m ³ sulfate de baryum	0,35	1,8	0,0045	—	—
Bentonite 60 kg/m ³ + phosphate + 200 kg/m ³ sulfate de baryum	0,8	2,5	0,0062	—	—
Bentonite 60 kg/m ³ + phosphate + 500 kg/m ³ sulfate de baryum	1	12,3	0,009	—	—
Bentonite + tanin + soude + CMC	—	—	—	0,7	0,0065
Bentonite + tanin + soude + chaux + amidon	—	—	—	0,85	0,0225
Bentonite + tanin + soude + 1 000 kg/m ³ sulfate de baryum	0,3	1,2	0,018	—	—
Bentonite + lignosulfonate de ferrocrome + CMC + gypse	0,3	3,5	0,003	—	—
Bentonite + phosphate de sodium + CMC + gasoil (10 %)	—	—	—	0,93	0,057
Eau salée saturée + sépiolite	0,9	6,45	0,003	—	—
Boue à l'huile (non alourdie)	—	—	—	0,9	0,195
Biopolymère 3 kg/m ³ + CrCl ₃ 0,8 kg/m ³	0,8	4,9	0,01	—	—

Variations des caractéristiques rhéologiques d'une boue à base d'eau et d'argile avec la température

Tableau 2

T (°C)	m	τ_{∞} (N/m ²)	η^z (PI)	$\eta^z/\eta_0^{(1)}$
17,25	0,5	9,3	0,04	37
65,5	0,5	10,3	0,019	44
104	0,8	6,1	0,01	38
160	0,9	5,8	0,0063	36

(1) η_0 est pris dans ce tableau à la pression de vapeur saturante.

Variations des caractéristiques rhéologiques d'une boue à base d'eau et de polymère avec la température

Tableau 3

T (°C)	m	τ_{∞} (N/m ²)	η^z (PI)	$\eta^z/\eta_0^{(1)}$
26	0,75	7,2	0,04	46
83	0,75	6,6	0,023	62
99	0,75	5,25	0,022	76
110	0,75	4,6	0,02	76
124	0,67	2,4	0,0165	74
124	0,4	0,2	0,011	49
(après 1 h à 124 °C)				
30 (après refroidissement)		$n = 0,86$ ($m = 0,14$) $K = 0,0375$ (M.K.S.)		

(1) Voir tableau 2.

(alourdisants) augmente considérablement la valeur de m et fait tendre le fluide vers un fluide de Bingham.

3.2.3 Variations des caractéristiques rhéologiques avec la température et la pression

Entre 0 et 500 bars, la pression n'a que très peu d'influence sur les boues à base d'eau. Pour les boues à base d'huile, l'influence est certainement plus importante; mais nous ne possédons pas de données précises dans ce domaine.

Les variations de caractéristiques rhéologiques avec la température sont parfois assez complexes. Elles sont, en effet, le résultat de plusieurs évolutions :

- variations de viscosité du liquide de base;
- modifications réversibles et irréversibles de la structure du fluide;
- dégradations irréversibles de certains additifs.

Pour des boues à base d'eau et d'argile, d'après quelques mesures faites au laboratoire ou des résultats de la littérature [2], il semblerait qu'entre 20° et 150 °C :

- le paramètre m augmente avec la température;
- les variations de τ_∞ dépendent du fluide considéré;
- la caractéristique η_∞ diminue avec la température. Dans un certain domaine de températures, le rapport η_∞/η_0 où η_0 représente la viscosité du liquide de base à la même température, reste sensiblement constant. On peut penser qu'une variation du rapport η_∞/η_0 est une conséquence d'une modification importante de la « structure » ou d'une dégradation de produit.

A titre d'exemple, le tableau 2 a été établi pour une boue contenant de la bentonite, du lignosulfonate de fer-chrome et du sulfate de baryum d'après des résultats extraits de la référence [2].

Pour les boues à base d'eau et de polymère (tabl. 3 et fig. 6) les variations sont différentes. En particulier, lorsque la température augmente, le paramètre m reste constant puis diminue lorsque la dégradation intervient. Le fluide semble tendre alors vers un fluide newtonien. Entre 26 et 110 °C, le rapport η_∞/η_0 varie avec la température.

3.3 Thixotropie.

La thixotropie est une propriété souhaitable dans les boues de forage, afin de tenir en suspension les particules dispersées, pendant les arrêts de circulation. Elle ne doit toutefois, pas être trop importante et ne pas avoir de conséquences fâcheuses pendant les manœuvres des tiges ou lors de la remise en circulation.

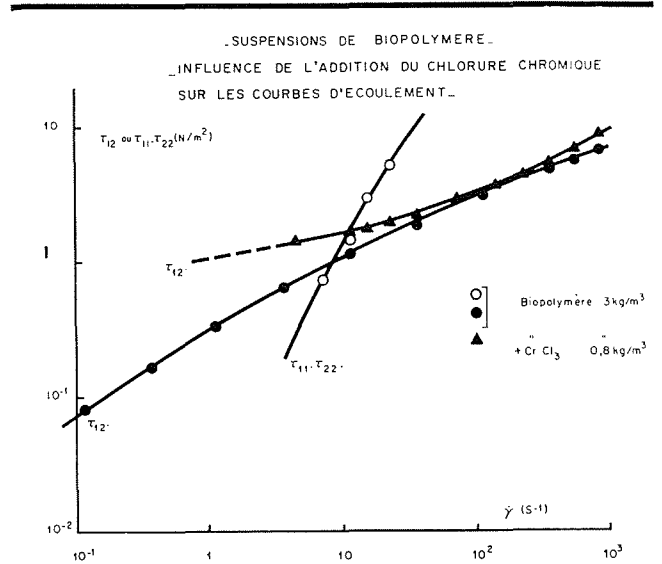
Le degré de thixotropie dépend de la composition de la boue. On note que si le paramètre m est voisin de 1, le fluide est toujours thixotrope.

REMARQUE.

La thixotropie rend souvent difficile la détermination de la courbe d'écoulement aux faibles vitesses de déformation, région qu'il est pourtant essentiel de connaître pour obtenir des valeurs correctes du paramètre m et des autres grandeurs caractéristiques.

4. — Ecoulement de la boue dans le sondage

Rappelons que, en cours de forage, à chaque cycle, la boue est injectée au sommet du train de tiges vers le fond du puits, traverse l'outil, remonte chargée des déblais par l'espace annulaire puis est envoyée dans les installations de surface. La vitesse de remontée dans l'espace annulaire est généralement de l'ordre de 1 m/s.



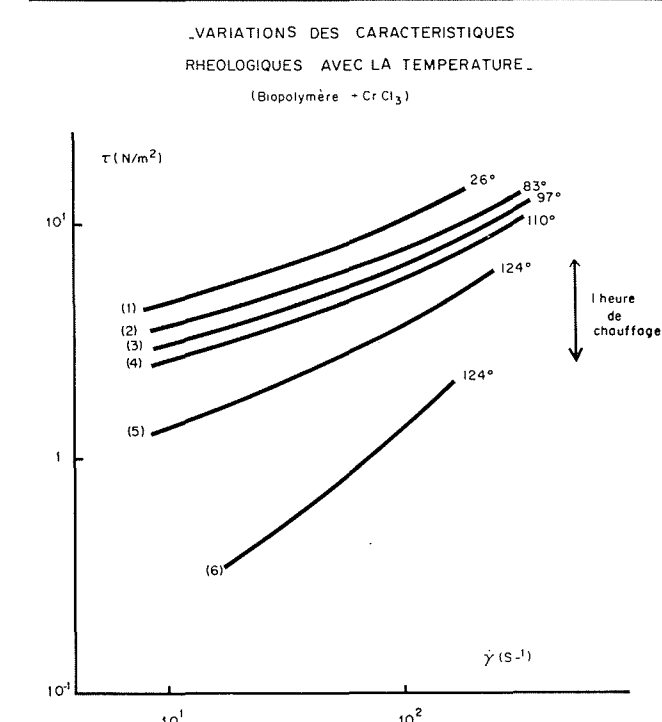
5/

Un des facteurs importants à connaître pendant la circulation de la boue, soit dans les tiges, soit dans l'annulaire, est le régime d'écoulement. De celui-ci dépend notamment :

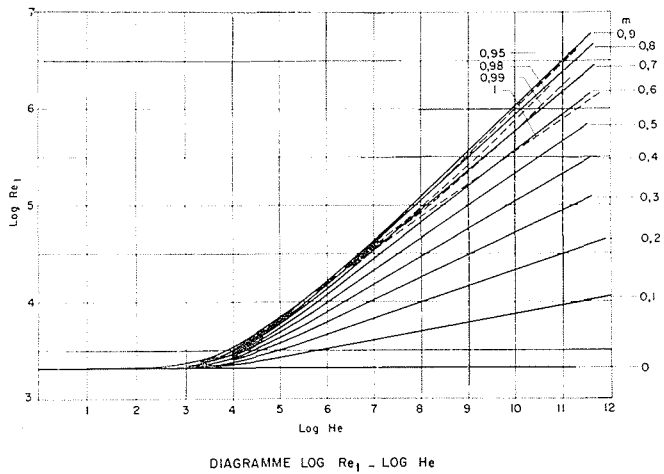
- les pertes de charges qui doivent rester compatibles avec les puissances de pompage et dont, dans certains cas, une évaluation assez précise est recherchée;
- les profils de vitesses qui, dans l'annulaire, ont une influence sur le nettoyage du puits [8].

On trouvera ci-après quelques données relatives aux fluides caractérisés par l'équation d'écoulement (1), concernant :

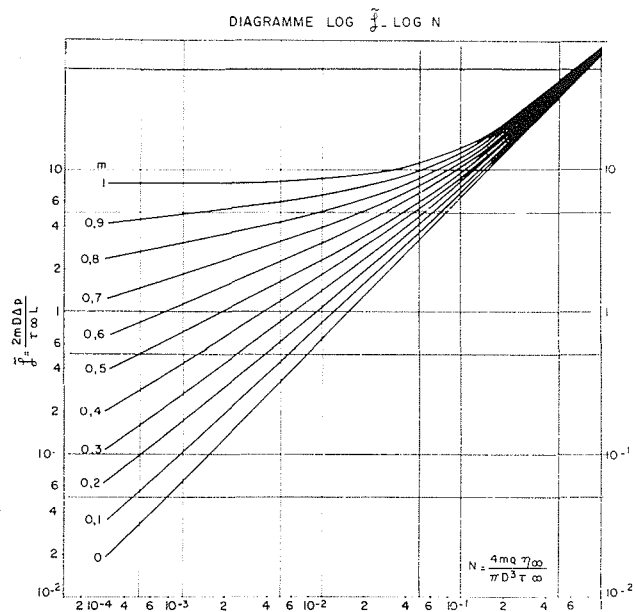
- la détermination du régime d'écoulement;
- l'écoulement en régime laminaire;
- l'écoulement en régime turbulent.



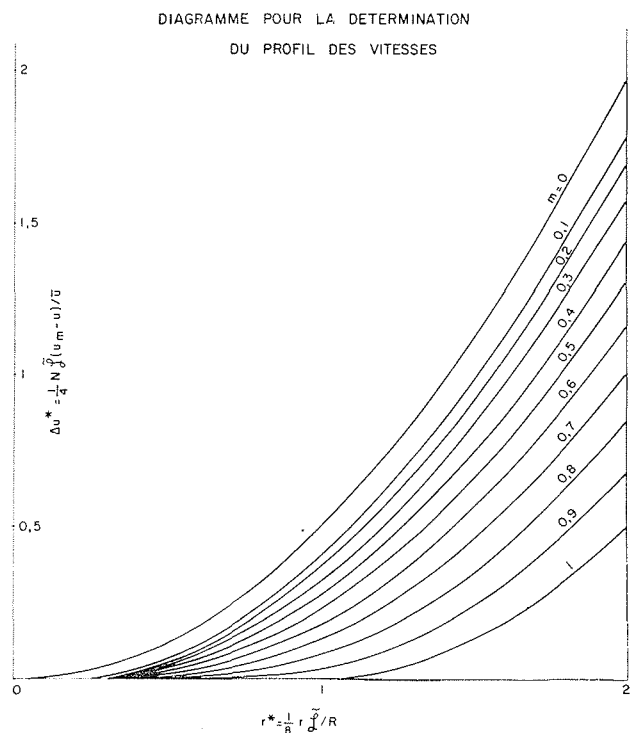
6/



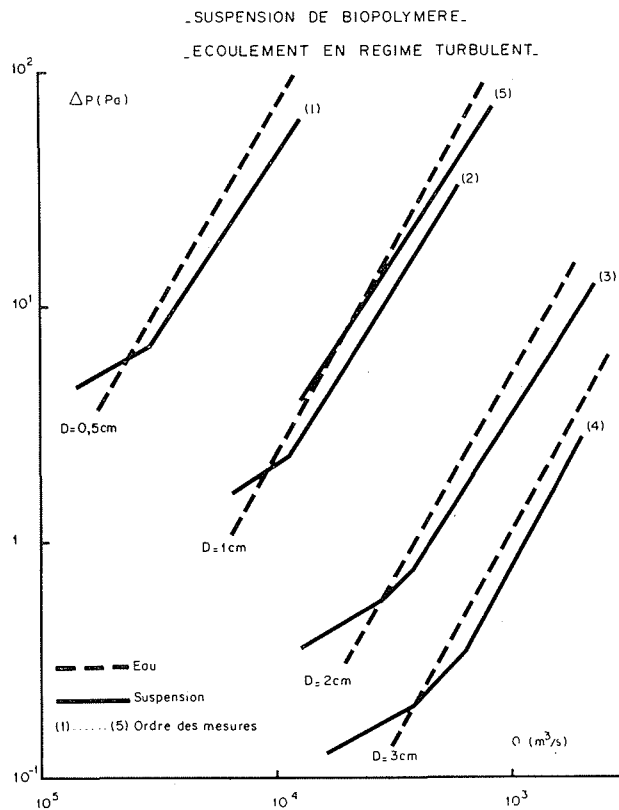
7/



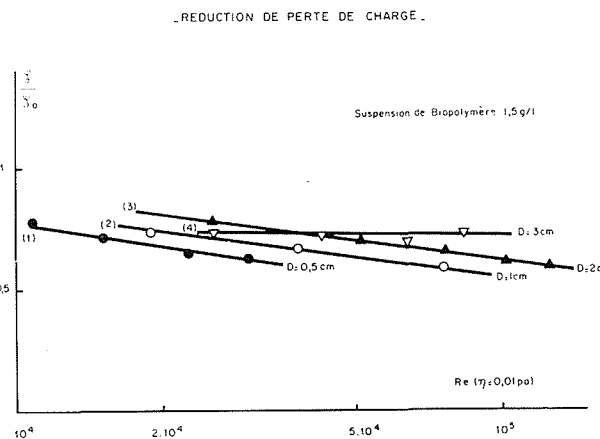
8/



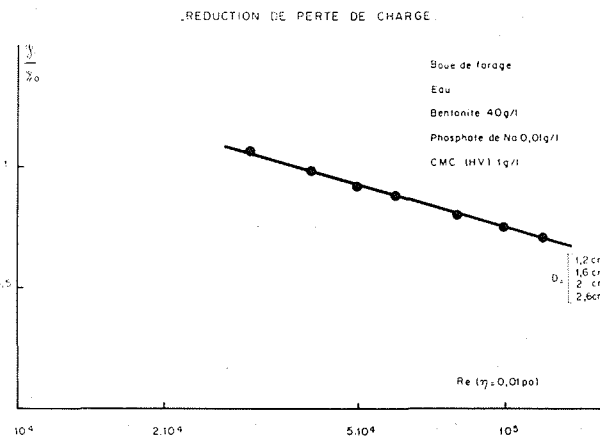
9/



10/



11/



12/

Dans ces données, les hypothèses simplificatrices suivantes ont été faites :

- les tiges sont assimilées à des tubes cylindriques lisses;
- les perturbations d'écoulement créées aux raccords ou lors des changements de diamètres de tiges ne sont pas prises en considération;
- il n'existe aucune excentricité des tiges dans le puits;
- la section du puits est constante et les parois parfaitement régulières. L'annulaire, pour la détermination du régime d'écoulement et pour le calcul des pertes de charge, est considéré comme un tube cylindrique dont le diamètre équivalent est fonction du diamètre intérieur du puits et du diamètre extérieur des tiges;
- le mouvement de rotation des tiges est négligé;
- les caractéristiques rhéologiques du fluide sont constantes pour toute la longueur de conduite considérée L.

4.1 Régime d'écoulement.

Pour une boue répondant à l'équation (1), il a été montré [3] que le passage du régime laminaire au régime turbulent dépendait de deux nombres sans dimensions, le nombre de Reynolds Re et le nombre d'Hedstrom He définis comme suit :

$$Re = \bar{u} D \rho / \eta_{\infty} \tag{7}$$

$$He = \tau_{\infty} D^2 \rho / m \eta_{\infty}^2 \tag{8}$$

\bar{u} : vitesse moyenne d'écoulement;
 D : diamètre de la conduite;
 ρ : densité du fluide.

Les valeurs du nombre de Reynolds de transition Re_t en fonction du nombre d'Hedstrom et du paramètre m sont présentées dans la figure 7.

EXEMPLE.

Pour une boue de caractéristiques suivantes :

$$m = 0,5; \tau_{\infty} = 10 \text{ N/m}^2; \eta_{\infty} = 0,01 \text{ Pl}; \rho = 1,3.$$

Si le diamètre de la conduite est 0,114 m (tige 4,5"), on trouve :

$$He = 3,1 \cdot 10^6$$

D'où :

$$Re_t = 14\ 000$$

Dans de nombreux cas, le calcul a montré que :

- dans les tiges, le régime est turbulent;
- dans l'annulaire, le régime est laminaire.

4.2 Ecoulement en régime laminaire.

Nous nous bornerons à indiquer ici les méthodes pour le calcul des pertes de charge et des profils de vitesses dans un tube cylindrique, de diamètre D.

4.2.1 Pertes de charge.

La figure 8 [1], [4] donne pour chaque valeur de m la relation entre le nombre \bar{f} proportionnel à la tension de cisaillement à la paroi (et à la perte de charge ΔP) et le nombre N proportionnel au débit Q :

$$\bar{f} = \frac{2 m D \Delta P}{\tau_{\infty} L} \tag{9}$$

$$N = \frac{4 m Q \eta_{\infty}}{\pi D^3 \tau_{\infty}} \tag{10}$$

Connaissant les caractéristiques du fluide, le débit, le diamètre de la conduite, on peut donc déterminer N et d'après le diagramme de la figure 8, \bar{f} . ΔP se déduit de la formule (9).

4.2.2 Profil des vitesses.

Le profil des vitesses lors de l'écoulement du fluide en régime laminaire dans une conduite cylindrique [4] peut être déterminé à partir de la figure 9.

Les coordonnées sont ici :

a) Δu^* , nombre sans dimensions proportionnel à $(u_M - u)/\bar{u}$. u_M est la vitesse maximale du fluide le long de l'axe, u est la vitesse d'un point situé à une distance r de l'axe.

On a :

$$\Delta u^* = 0,25 N \bar{f} (u_M - u) / \bar{u} \tag{11}$$

b) r^* , rayon réduit tel que :

$$r^* = (r/8 R) \bar{f} \tag{12}$$

R étant le rayon du tube.

\bar{f} et N étant connus, r^* peut être déterminé pour chaque valeur de r . On déduit du diagramme de la figure 9, Δu^* et par suite le rapport $(u_M - u)/\bar{u}$.

Il est à noter que le profil des vitesses dépend essentiellement du paramètre m .

4.3 Ecoulement en régime turbulent.

Il y a lieu de distinguer deux cas :

- cas des boues à base d'argile ne contenant pas ou contenant peu de haut polymère;
- cas des boues à base de polymère ou des boues contenant une faible teneur en solide par rapport à la teneur en haut polymère.

4.3.1 Boue à base d'argile.

Dans le domaine des hypothèses simplificatrices précédemment faites, la relation entre le coefficient de perte de charge linéique : $f = 2 D \Delta P / \bar{u}^2 \rho L$ et le nombre de Reynolds ($\bar{u} D \rho / \eta_{\infty}$) est sensiblement la même que pour un fluide newtonien. Des lois telles que la loi de Blasius permettent de calculer avec une bonne approximation les pertes de charge, au moins tant que le nombre de Reynolds n'atteint pas des valeurs trop élevées.

4.3.2 Boue contenant une teneur importante en haut polymère.

On observe alors le phénomène constaté avec de nombreuses solutions ou suspensions de polymère : il y a réduction des pertes de charge, ainsi que le montrent les figures 10, 11 et 12. Dans les figures 11 et 12, f_0 représente la perte de charge linéique relative au liquide de base (ici, l'eau).

Pour la boue à base de biopolymère, il se produit au cours de la circulation une dégradation mécanique des chaînes du polymère, ce qui diminue la réduction de perte de charge. Ceci peut expliquer, en particulier, la position de la courbe relative au diamètre 3 cm, par rapport aux courbes relatives aux autres diamètres. L'origine de cette réduction n'est pas parfaitement connue. Plusieurs explications peuvent être avancées [5]. Il semble que l'importance de la réduction de pertes de charge dépende :

- de la molécule du polymère (forme-masse);
- de la concentration
- souvent, du diamètre du tube.

Mais il est difficile, sans expérience préalable, de déterminer quelle sera la perte de charge. Une formule pour le calcul des pertes de charge a été proposée par Lord, Hulsey et Melton [6]. Elle généralise pour tous les débits et tous les diamètres l'expression suivante :

$$D^{1,2} \Delta P / 4 L = A (8 V)^s$$

s a pour expression :

$$s = d \log \Delta P / d \log Q$$

(en régime turbulent)

A est un coefficient (dont les dimensions dépendent de s) caractéristique du fluide;

s et A sont déterminés expérimentalement par des mesures de pertes de charge dans des tubes de diamètre connu.

En fait la formule n'a été vérifiée par ses auteurs ou par nous-mêmes que pour des tubes de diamètre inférieur à 3 cm et des débits ne dépassant pas $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Conséquence de la présence de haut polymère dans la boue.

On lit couramment dans la littérature spécialisée [7] qu'un des avantages du forage avec une boue au biopolymère est l'obtention d'une vitesse d'avancement plus élevée. Les arguments présentés sont les suivants : on a constaté que la vitesse d'avancement est d'autant plus grande que la viscosité de la boue est plus faible; or pour les boues au biopolymère, la variation de viscosité avec la vitesse de déformation est telle que, aux vitesses de déformation rencontrées dans l'outil (entre 10^4 et 10^5 s^{-1}) la viscosité est beaucoup plus faible que pour les boues à base d'argile. Mais, on peut se demander :

— d'une part, si cette variation de viscosité est bien un résultat expérimental ou a été calculée à partir d'une hypothèse plus ou moins justifiée sur l'équation rhéologique;

— d'autre part, comment intervient la viscosité à la sortie de l'outil, où le régime est turbulent.

Il semblerait tout aussi justifié de penser que l'augmentation de la vitesse d'avancement est liée à la réduction de frottement caractéristique du type de boue. La diminution de pression différentielle entre le fond du trou et les pores de la roche due à la réduction de pertes de charge dans l'annulaire — si l'écoulement est alors turbulent — pourrait, par exemple, contribuer à l'augmentation de la vitesse d'avancement.

5. — Conclusion

La nécessité d'utiliser dans la préparation et l'entretien des boues de forage des produits autres que l'eau et l'argile, par suite des conditions de forage de plus en plus difficiles, conduit donc à réviser les notions longtemps admises sur la rhéologie de ces boues.

L'addition de chaque produit entraîne une modification de la structure du fluide et, par suite, de ses propriétés rhéologiques dont une équation telle que l'équation de Bingham ne rend pas toujours compte. L'équation d'écoulement à trois paramètres, vérifiée pour de nombreux exemples, apporte une détermination plus rigoureuse des caractéristiques rhéologiques et permet souvent une prévision plus exacte des grandeurs et propriétés dépendant de ces caractéristiques, telles que les pertes de charge et les profils de vitesses.

Du point de vue pratique, la détermination des trois paramètres est un peu plus délicate que certaines déter-

minations normalisées et semble difficile à réaliser au laboratoire de chantier.

Il faut, d'ailleurs, distinguer entre le but des mesures de contrôle nécessairement simples et rapides et le but des mesures plus élaborées. Dans le premier cas, des résultats comparatifs de mesures correspondant à des conditions expérimentales toujours identiques, permettent à l'opérateur de juger de la qualité de la boue, même si l'interprétation de la signification physique des grandeurs déterminées n'est pas tout à fait exacte. Dans le second cas, les résultats sont le plus souvent destinés à être utilisés dans certains calculs et une plus grande rigueur s'impose dans la méthode expérimentale et l'interprétation des mesures.

6. — Liste des symboles

- D : diamètre de la conduite;
 f : coefficient de perte de charge linéique relatif à la boue;
 f_0 : coefficient de perte de charge linéique relatif au liquide de base;
 \bar{f} : nombre sans dimension (équation 9);
 He : nombre d'Hedström (équation 8);
 K : indice de consistance (équation 3);
 L : longueur de la conduite;
 m : paramètre sans dimension caractéristique du fluide (équation 1);
 N : nombre sans dimension (équation 10);
 n : indice rhéologique (équation 3);
 ΔP : perte de charge;
 Q : débit;
 Re : nombre de Reynolds (équation 7);
 \bar{u} : vitesse moyenne d'écoulement;
 $\dot{\gamma}$: vitesse de déformation;
 $\dot{\gamma}^*$: vitesse de déformation réduite (équation 5);
 η : viscosité apparente;
 η_0 : viscosité newtonienne du liquide de base;
 η_∞ : viscosité caractéristique du fluide (équation 1);
 τ_{12} : tension tangentielle de cisaillement;
 τ_∞ : tension caractéristique du fluide (équation 1);
 τ^* : tension réduite (équation 6).

7. — Bibliographie

- [1] MARTIN (M.) et LE FUR (B.). — Etude de l'écoulement laminaire d'un fluide non newtonien dans un tube de section circulaire. Application aux boues de forage. *Rev. I.F.P.* 18, n° hors-série, p. 32 (1963).
- [2] BARTLETT (L. E.). — Effect of temperature on the flow properties of drilling fluids. Paper S.P.E. n° 1861, *42nd annual S.P.E. Mtg.*, Houston, (1-4 octobre 1967).
- [3] LE FUR (B.), MARTIN (M.) et CURTZ (P.). — Transition de l'écoulement de liquides non newtoniens dans des conduites circulaires. C.R. 2^e colloque A.R.T.F.P., p. 113-130, Ed. *TECHNIP*, Paris (1965).
- [4] LE FUR (B.) and MARTIN (M.). — Flow of drilling muds and suspension. *J. of Fluid Mec.*, 30, part. 3, p. 449-464 (1967).
- [5] Viscous Drag Reduction. Proc. of the Symposium on Viscous Drag Reduction. Ed. C. Sinclair Wells, L.T.V. Research Center, Dallas, Plenum Press, New York (1969).
- [6] LORD (D. L.), HULSEY (B. W.) and MELTON (L. L.). — General Turbulent Pipe Flow scale up correlation for rheologically complex Fluids. Paper S.P.E. n° 1680, *S.P.E. Symp. on Mechanics of Rheologically complex Fluids*. Houston (15-16 décembre 1966).
- [7] New biopolymer low-solids mud speeds drilling operation. *Oil-gas J.*, p. 62-70 (26 décembre 1967).
- [8] PARIGOT (P.) et MARTIN (M.). — Boue au biopolymère, particularités rhéologiques. *Forages*. (A paraître.)