

Utilisation de systèmes argileux pour le colmatage des pertes de boues de forage en circulation

N. Kherfella (épouse Haddoum)¹, K. Bekkour² et S. Benhadid³

¹*Division Forage, Direction Engineering, SONATRACH
10, rue du Sahara, Hydra, Alger, ALGERIE*

²*Institut de Mécanique des Fluides, UMR 7507 ULP-CNRS
2, rue Boussingault, 67000, Strasbourg, FRANCE*

³*Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène
Institut de Physique, Laboratoire de Rhéologie, BP 32, El Alia, ALGERIE*

Reçu le 15 mars 2004 - Version finale acceptée le 27 octobre 2004

Résumé : Le déroulement normal des opérations de forage du champ de Hassi-Messaoud et plus précisément celui de la phase 8''1/2 est très souvent interrompu par plusieurs problèmes englobant la tenue des parois du trou, les pressions rencontrées et le contrôle des fluides contenus dans les formations forées. Dans ce contexte, le travail entrepris consistait essentiellement en la préparation de laitiers colmatants contre les pertes de boues et de cavage. Les pertes en circulation sont la conséquence logique d'un déséquilibre de pression, existant ou créé, momentané ou permanent, entre le milieu traversé et les fluides utilisés en forage. Afin d'y remédier, des bouchons de ciment sont souvent utilisés pour colmater ces pertes. Lors de la rencontre de pertes importantes, on arrive à installer plus de six bouchons de ciment, ce qui est un inconvénient majeur pour l'avancement de l'opération de forage en terme de temps et de coût. La solution proposée est l'injection d'un seul "bouchon de type plastique", ajustable suivant la fréquence des pertes, allant de simples fissures aux fractures. Ce type de bouchon est à base d'une variété d'argiles. Une caractérisation et une modélisation du comportement rhéologique de ces argiles ont été effectuées. Trois systèmes de laitiers ont été considérés : un laitier formulé, où l'on observe un excès de phase aqueuse après mélange des composants, et que l'on appellera "direct"; un autre laitier formulé, où l'on observe un excès de phase huileuse, que l'on appellera "inverse"; et enfin, le laitier caractérisé par l'absorption totale des composants, qui se présente sous forme d'une pâte consistante de type mastic, que l'on nommera "mixte". Il a été confirmé que les formulations de ces bouchons, préparées en conditions de surface, présentent les mêmes caractéristiques qu'en conditions de fond. Ceci a été nettement observé suite aux tests de consistométrie. Les réactions de prise de ces bouchons sont instantanées dans les deux cas, avec un simple brassage des différents composants du mélange. Une procédure appropriée est recommandée pour l'injection de ce type de bouchon.

Mots-clé : Ecoulement, consistométrie, rhéologie, argiles, colmatage, pertes, forage.

1. Introduction

Malgré les progrès de tout ordre réalisés au cours des vingt dernières années, les pertes de boue constituent, de nos jours encore, un obstacle majeur au déroulement normal des opérations de forage. C'est un obstacle puisque, mis à part les cas très particuliers où le forage peut se poursuivre en injection perdue, la perte impose un arrêt de forage dont la durée est difficilement prévisible, pouvant aller jusqu'à la perte du puits. Les causes majeures de ce problème sont la nature de la formation, le faciès, l'histoire géologique, la résistance mécanique... Le champ de Hassi Messaoud considéré dans cette étude est un vaste anticlinal

sub-circulaire, traversé par un important réseau de failles et de fractures sub-verticales, de direction nord-est/sud-ouest. Il comporte quatre réservoirs d'âge Cambrien (R3, R2, Ra, anisométrique et isométrique), tous composés de grès quartzitiques à fines intercalations de silts. Le Ra est le réservoir principal du gisement, qui se distingue par ses meilleures qualités pétrophysiques. Subdivisé en cinq drains (D1, ID (inter-drain), D2, D3 et D4), ce réservoir peut atteindre 120 m d'épaisseur lorsqu'il n'est pas affecté par la discordance hercynienne. Le champ de Hassi Messaoud est subdivisé en 25 zones de production, ayant des caractéristiques pétrophysiques différentes et des régimes de pression indépendants.

2. Principaux types de pertes et localisation

Les conditions économiques et environnementales de l'industrie pétrolière imposent que les opérations de forage doivent être conduites avec un maximum d'efficacité et de sécurité. Le contrôle et la prévention des pertes de boue sont des priorités pour respecter de telles exigences, essentiellement lors des opérations de forage du réservoir.

On rencontre des pertes naturelles qui se produisent dans des vides créés (fractures ou fissures induites) lorsque la pression exercée par la colonne de boue est supérieure à la pression de seuil de fracturation de la formation.

Cette valeur seuil représente la valeur minimale qui correspond à la contrainte minimale de résistance de la formation. La formation est soumise à trois types de contraintes : la contrainte géostatique verticale (c'est la densité des terrains, déterminée par les "logging" électriques), la contrainte horizontale maximale et la contrainte horizontale minimale. Ces deux dernières sont mesurées en fonction du degré d'ovalisation du trou du puits. On a présence d'un seuil de craquage quand la pression hydrostatique est supérieure à la contrainte géostatique verticale. Ainsi, des pertes par craquage se produisent systématiquement dans n'importe quel type de formation, chaque fois que ces formations auront, soit dans leur ensemble (sables, sables argileux ou argiles sableuses, craies...), soit au niveau de plans de moindre cohésion tels que surfaces de contact ou plans de schistosité (marnes litées, schistes...), des forces de cohésion, caractérisées par ce qu'il est convenu d'appeler un "seuil de résistance à la fracturation", inférieures à la pression hydrostatique ou dynamique exercée par la colonne de boue au repos ou en circulation [1-5].

3. Causes principales et méthodes de prévention

Les pertes en circulation sont la conséquence directe et logique d'un déséquilibre de pression existant ou créé, momentané ou permanent, entre le milieu traversé et les fluides utilisés dans le forage. Ce déséquilibre a très souvent des causes parfaitement naturelles contre lesquelles il est très difficile de se prémunir, comme par exemple la rencontre de fissures ou fractures ouvertes occupées par un fluide (air ou eau) sous pression normale.

Si tel est le cas, et pour peu que la densité de la boue soit supérieure à un, la perte sera difficilement évitable. Il en sera de même chaque fois que, dans une même phase de forage, on adoptera des densités

de boue élevées pour combattre soit des phénomènes de parois, soit des venues de fluides sous pression supérieure au seuil de craquage de ces formations [6-9].

4. Comment remédier aux problèmes de pertes de boues ?

La solution proposée est l'injection de "bouchons plastiques", ajustables suivant la nature des pertes, allant de simples fissures jusqu'aux fractures. Ce type de bouchon présente plusieurs avantages. Sa durée de mise en place est courte. Il se compose de produits locaux disponibles et la prise se fait d'une façon instantanée au fond du puits, lors du contact des composants du mélange. Le laitier formulé en surface (pression atmosphérique, température ambiante) garde les mêmes caractéristiques en conditions de fond ($T > 100^{\circ}\text{C}$, $P > 5 \text{ MPa}$). Le reforage du laitier n'est pas nécessaire, car il est facilement lavable avec la boue.

Débit de Perte (m ³ /h)	Côte de pose du laitier	Débit de mise en place (L/mn)
3-5	niveau inférieur de la perte	800-1000
5-10	10 m au dessus du niveau de la perte	600-800
10-20	20 m au dessus du niveau de la perte	500

Tableau 1. Conditions de pose du laitier

Les côtes de pose du laitier et les débits de mise en place dépendent des débits de pertes mesurés. Le Tableau 1 donne les ordres de grandeur des valeurs à recommander.

5. Protocole expérimental et méthodologie

Des échantillons de bentonite ont été intimement mixés dans de l'eau distillée à différentes concentrations. Les mêmes tests ont été effectués avec de l'argile organophile dans le gasoil. Les dispersions ont été mixées pendant 20 mn. Un viscosimètre de type "low shear 40" (système MSDIN 406, cylindres concentriques, 3.25 mm de diamètre externe, 3 mm de diamètre interne) a été utilisé pour effectuer les tests expérimentaux.

La bentonite est définie comme étant une argile constituée à plus de 85 % de montmorillonite dont les caractéristiques physico-chimiques sont données dans le Tableau 2. Les cations échangeables les plus rencontrés de cette argile sont : Na^+ , Ca^{2+} et, à un degré moindre, Mg^{2+} .

Densité (g/cm ³)	Humidité (%)	C.E.C (meq/100g)	pH (25°C)	Pertes au feu (%)
2,4 - 2,6	18 - 20	62 - 66	8 - 9	2,35 - 2,48

C.E.C : capacité d'échange cationique.

Tableau 2. Propriétés physico - chimiques des argiles

En Algérie, les réserves de bentonite comptent parmi les plus importantes dans le monde. Les produits finis sont obtenus après traitement de la bentonite brute selon le procédé résumé comme suit : stockage du minerai brut; concassage (diamètre < 75 mm); addition d'adjuvants à sec (carbonate de sodium, alcool vinylique); broyage et séchage (diamètre 10 mm, humidité 5%); broyage final et classification; raffinage (séchage complet, diamètre < 74 μ m); ensachage (sacs de 50 kg pour les fluides de forage).

Par un processus d'échange cationique, l'argile initialement hydrophile peut agir avec des sels d'amine aliphatiques ou avec des sels et bases d'ammonium quaternaire, pour donner une argile organophile. Ces produits sont préparés à partir de la bentonite ou de l'attapulгите, par l'ajout de cations amino-organiques à une suspension aqueuse d'argile. Le groupement amine prend la place du cation échangeable (Na^+ ou Ca^{2+}) présent initialement dans l'espace interfoliaire et la chaîne hydrocarbonée prend celle des molécules d'eau absorbées [10]. La dispersion de l'argile dans le gasoil donne, après une brève agitation (15 mn), une boue de couleur jaune blanchâtre, très homogène et très stable (pas de séparation). Elle se présente sous l'aspect d'une graisse souple et très légère. Suivant la concentration, cette graisse peut être très fluide (apparence huileuse pour les concentrations inférieures à 3 %) ou très consistante (pour les concentrations supérieures à 5 %). Cela est synonyme d'un excellent gonflement de l'argile dans le gasoil, ce qui prouve son affinité prononcée vis à vis de ce solvant et confirme son caractère organophile.

Six échantillons de suspensions de bentonite ont été préparés (4, 5, 6, 7, 8 et 9 % de bentonite avec de l'eau) (Figs. 1 et 2). Un temps de repos de 24 h a été respecté pour tous les échantillons. Des concentrations de 4 et 8 % de bentonite ont été utilisées pour étudier l'influence du temps de vieillissement (Figs. 3 et 4).

Les argiles organophiles sont définies comme étant des argiles échangées avec des agents de surfaces spécifiques pour acquérir des propriétés favorisant leur dispersion dans les milieux organiques. Elles

présentent un intérêt considérable en raison de l'importance de leurs applications dans différents secteurs industriels (forage, peintures, traitement des eaux, fonderie, cosmétiques...).

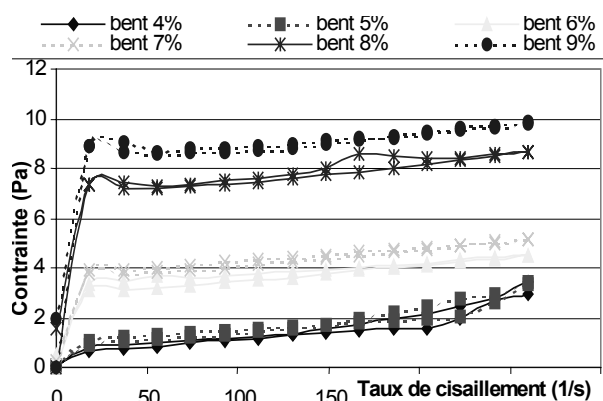


Figure 1. Rhéogramme pour différentes concentrations de bentonite pour un temps de vieillissement de 24h.

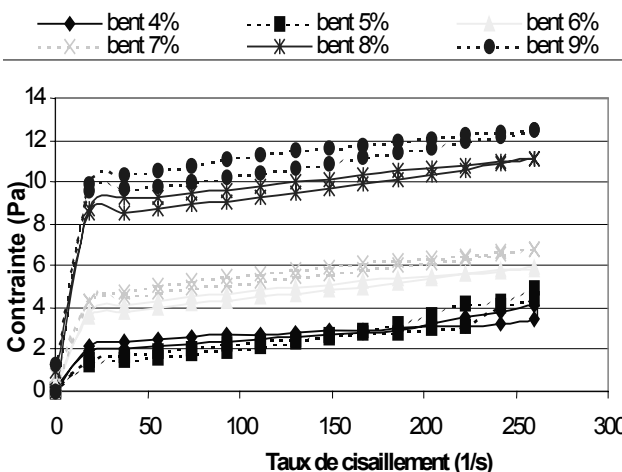


Figure 2. Rhéogramme pour différentes concentrations de bentonite pour un temps de vieillissement de 5 jours

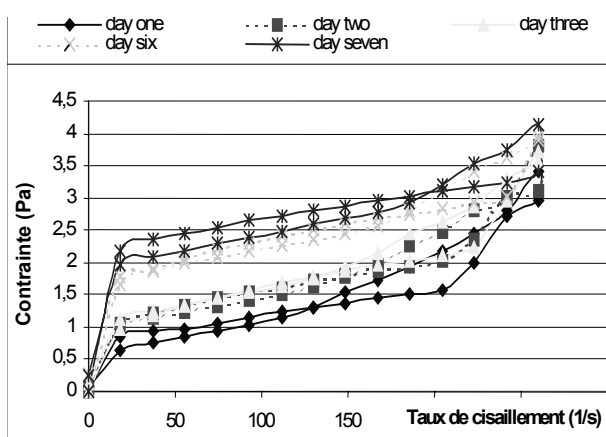


Fig. 3 - Rhéogramme pour différents temps de vieillissement à 4 % de bentonite

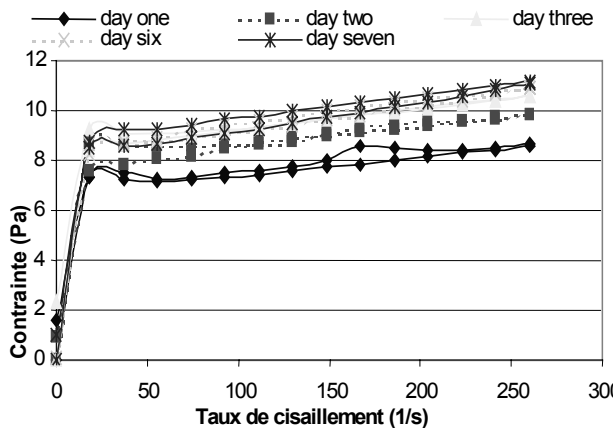


Fig. 4 - Rhéogramme pour différents temps de vieillissement à 8 % de bentonite

Six échantillons ont été préparés à différentes concentrations (4, 6, 8, 10, 12 et 14 % d'argile organophile dans de l'huile) (Figs. 5 et 6). Les tests rhéologiques ont été effectués après 24 h. Des concentrations de 4 % et 10 % d'argile organophile ont été utilisées pour déterminer l'influence du temps de vieillissement (Figs. 7 et 8).

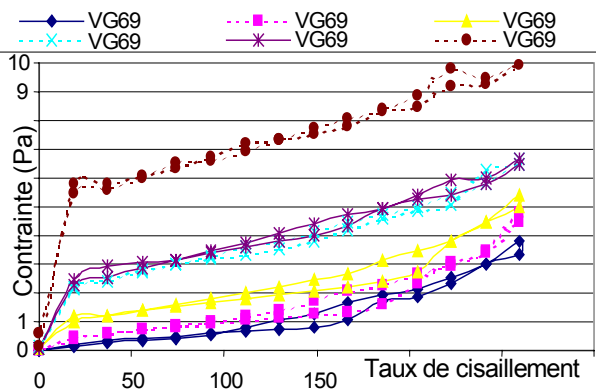


Fig. 5. Rhéogrammes pour différentes concentrations d'argile organophile pour un temps de vieillissement de 24h

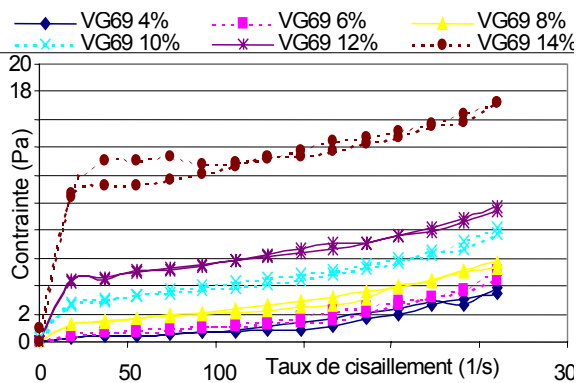


Fig. 6. Rhéogrammes pour différentes concentrations d'argile organophile pour un temps de vieillissement de 5 jours

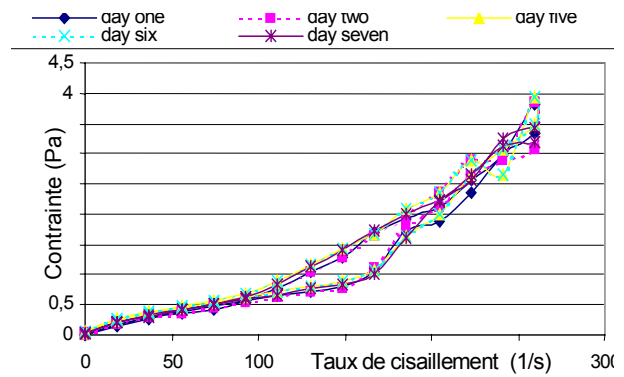


Fig. 7. Rhéogrammes pour différents temps de vieillissement à 4 % d'argile organophile

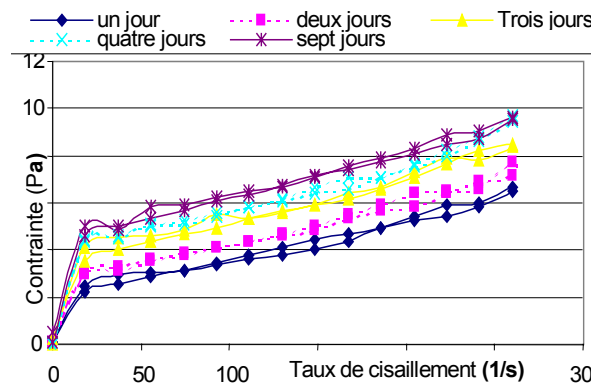


Fig. 8. Rhéogrammes pour différents temps de vieillissement à 10 % d'argile organophile

6. Comportement rhéologique des suspensions argileuses

Après analyse des résultats expérimentaux par la méthode de Levenberg-Marquart [11], il apparaît que le modèle de Casson ($\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\eta \dot{\gamma})^{1/2}$) est le plus représentatif. Cette méthode d'optimisation est basée sur une régression non-linéaire. Elle présente l'avantage de condenser les deux algorithmes de Newton et du Gradient en un seul et converge même pour un estimé initial mal choisi. La variation de la contrainte seuil pour différentes concentrations, à différents temps de vieillissement, est donnée par les Tableaux 3 et 4.

C (%)	4	6	8	10	12	14
1 jour	0,397	0,568	0,602	0,712	0,880	0,138
3 jours	0,433	0,618	0,630	1,762	1,934	2,777
4 jours	0,530	0,623	0,730	1,862	2,879	2,980
5 jours	0,580	0,702	0,832	1,998	2,998	3,125

Tableau 3 – Variation de la contrainte seuil (Pa) pour la bentonite

C(%)	4	5	6	7	8	9
1 jour	0,034	0,036	0,043	0,055	0,088	0,138
2 jours	0,298	0,381	0,809	1,425	1,934	2,777
3 jours	0,354	0,407	0,977	1,862	2,879	2,980
4 jours	0,405	0,507	0,191	1,998	2,998	3,125
5 jours	0,522	0,601	0,294	2,120	3,102	3,314

Tableau 4- Variation de la contrainte seuil (Pa) pour l'argile organophile

L'examen plus fin des courbes de montée pour les suspensions des deux types d'argile étudiées, pour des concentrations élevées, permet de mettre en évidence les caractéristiques suivantes [12-14]:

- au début du cisaillement, le mélange boueux a un comportement de type solide. La contrainte n'est pas suffisante pour créer un écoulement. L'existence du seuil d'écoulement est associée à la présence de forces de Van Der Waals qui favorisent la formation de floccs ou d'agrégats de particules et qui provoquent une résistance à l'écoulement.

- à faible gradient de vitesse (inférieur à une dizaine de s^{-1}), quand le seuil d'écoulement est passé, l'échantillon se fluidifie brutalement. Les liaisons ioniques et électrostatiques entre les particules et les agrégats de particules se brisent progressivement. Le gradient de vitesse augmente régulièrement de manière quasi-linéaire avec la contrainte. La viscosité apparente chute très rapidement.

- brutalement, la pente de la courbe d'écoulement change, pour se stabiliser ensuite en dépassant l'overshoot, pour un gradient de vitesse compris entre 15 et 35 s^{-1} . Toutes les particules sont orientées selon les lignes de courants. Dans cet état, la viscosité peut être approchée par un modèle phénoménologique faisant intervenir la concentration massique.

Le temps de vieillissement influe sur les paramètres rhéologiques des suspensions argileuses par une augmentation des valeurs de ces paramètres

7. Tests de consistométrie à haute pression et haute température (HTHP)

L'équipement Newsco (Fig. 9) a été utilisé afin d'effectuer les tests de consistométrie sous haute pression et haute température (HPHT). Cet équipement est destiné à déterminer le temps de consistance des laitiers de ciment sous haute

pression (supérieure à 10 MPa) et haute température (supérieure à 170°C). Les résultats obtenus obéissent aux normes API. Les paramètres essentiels déduits sont respectivement :

- le temps de pompabilité du laitier fluide, déterminé à une valeur de 40 UC (unité de consistance, unité arbitraire allant de 0 à 100);
- le temps de prise, déterminé à une valeur de 100 UC. Cette valeur indique à quel moment le laitier devient impompable (c'est-à-dire qu'il est en phase de durcissement).

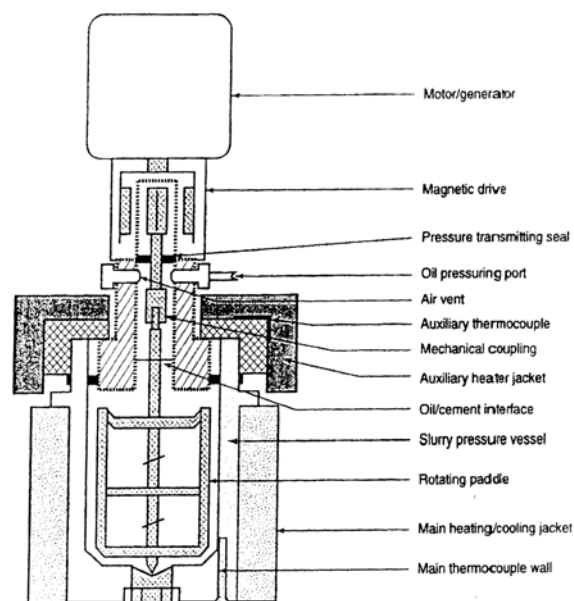


Fig. 9. Appareil 'NOWSCO' pour des tests de consistométrie en HTHP

Les composants utilisés sont les suivants : A (phase aqueuse), B (argile hydrophobe), C (argile hydrophile), D (phase huileuse).

Trois systèmes de laitiers différents ont été formulés: le système direct qui, lors du mixage des composants, donne un excès de phase aqueuse; le système inverse, caractérisé par un excès de phase huileuse; enfin, le système mixte, défini par l'absorption des différents composants : il se présente sous forme d'une pâte consistante qui ressemble au mastic.

Le mélange des systèmes direct (C+D) et inverse (A+B) simultanément a été effectué à l'aide d'un agitateur normalisé de type "Chandler", utilisé pour les ciments pétroliers et ce, pendant 5 mn. On conditionne les deux produits incompatibles C+D pour le système direct, et A+B pour le système inverse, à différentes concentrations d'argile dans la cellule du "consistomètre atmosphérique" pendant 20 mn, afin de conditionner le mélange à une

température simulant la zone de perte qui est de 70°C. Ces mélanges sont systématiquement injectés en présence de A pour le système direct, D pour le système inverse, dans les cellules du consistomètre pressurisé à 38 MPa et 70°C.

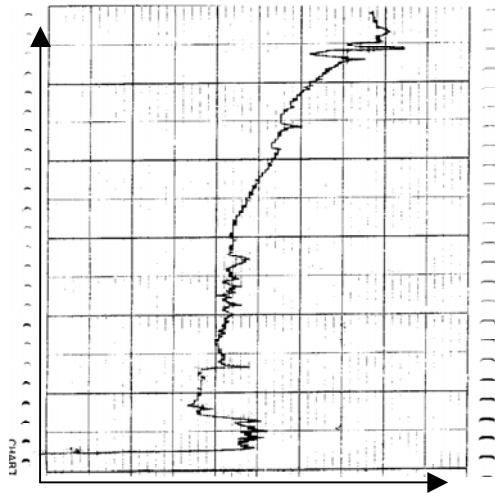


Fig. 10. Test de consistométrie pour la bentonite à 70%

Les enregistrements sont présentés sur les Figures 10 et 11. Il est à constater que la prise est très rapide pour les systèmes directs et inverses, montrant la présence d'un pic juste au début de la rotation des palettes du godet du consistomètre. La consistance des laitiers croît avec l'augmentation des concentrations en argile. Cette consistance peut être déterminée par l'appareil de Vicat normalisé pour les ciments pétroliers.

Pour les systèmes mixtes à différents rapports de concentrations en argile (montmorillonite et argile organophile), il est à noter que le mélange s'épaissit en fonction du temps de mixage.

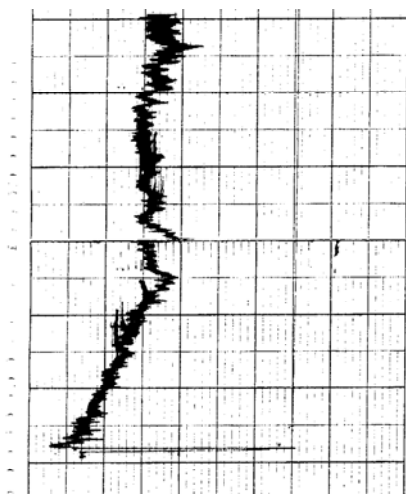


Fig. 11. Test de consistométrie pour l'argile organophile à 80 %.

8. Conclusion

L'argile hydrophobe, ne gonflant pas dans l'huile, peut être incorporée à des quantités très importantes, tout en conservant au mélange une excellente pompabilité. Il est même recommandé de pousser la charge suffisamment pour que l'effet de masse contrecarre la tendance à la sédimentation.

Lorsque ce mélange vient au contact de l'eau de la formation à perte ou même de l'eau de la boue, l'argile hydrophobe s'hydrate très rapidement et la phase huileuse est expulsée. Il se forme alors un mélange très consistant, donc susceptible d'obturer et de se maintenir en place dans des fissures ou des crevasses de dimensions importantes.

L'étude du comportement rhéologique de ces argiles a montré un comportement viscoplastique pour des concentrations élevées. De plus, les paramètres rhéologiques (déterminés par la méthode d'optimisation de Levenberg-Marquart) évoluent en fonction du temps de vieillissement.

Les tests de consistométrie effectués à haute pression et haute température simulant la zone de perte (70°C, 48 MPa), ont montré la présence de fluctuations. Pour les systèmes direct et inverse où l'on observe un excès de phase aqueuse ou huileuse, la pâte formée instantanément se décolle de la paroi de la cellule du consistomètre : ce qui est enregistré est le contact du fluide avec la paroi, interprété par les fluctuations observées sur les enregistrements. Pour les trois systèmes étudiés, le phénomène de prise reste toujours instantané pour les systèmes direct et inverse, et progressif pour le système mixte. La prise s'effectue avec un simple brassage des palettes de la cellule HPHT du consistomètre.

9. Références

- [1] Messenger J.U., How to combat lost circulation, Field Research Laboratory, Mobil Research Development, Dallas. pp. 83 - 85 (1969).
- [2] Howard C. G., Scott P.P., An analysis and the control of lost circulation, *Petroleum Transactions, AIME*, 192, 171-192 (1951).
- [3] Canson. B.E., Lost circulation treatments for naturally fractured, vugular or cavernous formations, *SPE/IADC*, 13440, 155-166 (1985).
- [4] Bardeen T., Teplitz A.J., Lost circulation information with a new tool for detecting zones of loss, *Petroleum Transactions, AIME*, 207, 36-41 (1956).
- [5] Goins W.C., Dawson D.D. Jr., Temperature surveys to locate zone of lost circulation, *Oil Gas J.*, 22, (1953).

- [6] Gatlin C., Nemir C.E., Some effects of size distribution on particle bridging in lost circulation and filtration tests; *J. Petroleum Technol.*, 575-578 (1961).
- [7] Messenger J.U., Common rig materials combat severe lost circulation, *Oil Gas J.*, June (1973).
- [8] Gockel J.F., Brinemann. M., Lost circulation: a solution based on the problem, *SPE/IADC*, 16082 (1987).
- [9] Scott P.P., Lumus Jr., J.L., New developments in the control of lost circulation, *Petroleum Branch, AIME*, Dallas, Texas, 516-G (1955).
- [10] Darley H.C.H., Gray G.R, *Composition and properties of drilling and completion fluids*, Fifth Edition, Gulf Publishing Company (1988).
- [11] S. S. Rao, *Engineering optimization*, Third Edition, Wiley-Interscience Publication, Indiana (1996).
- [12] Berthier P. Flaud P., Caractérisation rhéologique en régime stationnaire et instationnaire d'un fluide de forage. *Cahiers Rhéol.*, 10, 3-4, 263-270 (1992).
- [13] Grossiord J.L., Terrisse, I., Seiller, M., Magnet, A., Le Hen-Ferrenbach, C., Apport des analyses rhéologiques à l'étude des émulsions multiples: Caractérisation, stabilité, libération. *Cahiers Rhéol.*, 10, 3-4, 299-305 (1992).
- [14] Van Olphen H., Particules associations in clay suspensions and their rheological implications, *C.M.S. Workshop Lectures*, Volume 4: clay-water interface and its rheological implication, 192-210 (1992).