



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique



Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
Département Hydraulique
Laboratoire de Recherche des Sciences de l'EAU

Mémoire de Magistère

Présenté par :

AMARA RABAH

Ingénieur en hydraulique de l'école nationale polytechnique

Thème

Modélisation d'écoulement des Fluides de Forage dans un Forage conventionnel

Application sur les forages de Hassi Mésaoud

JURY

Président	BENMAMAR Saadia	Maître de conférences, ENSP
Directeur de la thèse	MITICHE-KETTAB	Maître de Conférence, ENSP
Examineurs	BERKANI Miloud	Chargé de cours, ENSP
	BLEK Amar	Chargé de cours, ENSP
	BEMOUNEH Abdelbaki	Maître de conférences Univ Boumerdes

Année universitaire 2008/2001

A mon père, à ma mère,
A mes grands père, à mes oncles,
A mes frères et sœurs et à toute ma famille,
A mes amis Abd Errahmen, Kacha, Sofiane, Ibrahim,
Ahmed, Fayçal, Abd el moumen, Ebd el hak, OL, mes amis de l'ENAC

Je dédie ce modeste travail

Remerciements

Je tiens à remercier ma promotrice **Mme R. MITICHE-KETTAB**, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique Alger, de m'avoir proposé ce sujet, et de m'avoir guidé tout au long de la préparation de ce mémoire.

Je remercie les membres de Jury d'avoir bien voulu examiner mon travail.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à l'ensemble des enseignants du département hydraulique qui n'ont jamais manqué de m'aider avec la grande sympathie.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à **Mlle KADI** (Sonatrach) et **Mr REMLI** pour leur aide, et leurs précieux conseils.

J'adresse mes vifs remerciements à **Mr.BENMOUNEH** du laboratoire LMMC (Université Boumerdes), ainsi qu'à **M. KHODJA** du laboratoire (CRD).

Enfin, mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près dans l'élaboration de ce mémoire.

ملخص :

تهدف دراستنا التجريبية الى استنتاج تغير الخصائص الريولوجية لأوحال الأبار الزيتية في الأبار البترولية بتغير التركيز مع التصرف الريولوجي والجهد الضائع . بالإضافة الى ايجاد النموذج اللأمثل لسير هذه الأوحال .
يمكن للنتائج المحصل عليها أن تساعد في تطوير خصائص الأوحال . لاعطاء الأبار مردود جيد خلال عملية الحفر .

الكلمات المفتاحية:

أوحال الأبار . اللزوجة . الانقصاص . التشوه . الجهد الضائع . التركيز .

RESUME :

Notre étude traite l'évolution des caractéristiques rhéologiques des boues de forage à base d'huile dans un forage pétrolier en fonction de la variation de la concentration, ainsi que l'influence de cette dernière sur le comportement rhéologique, et les pertes de charges. On a déterminé le modèle qui s'adapte le mieux à l'écoulement de cette boue.

Les résultats obtenus peuvent améliorer les boues de forages, pour donner au puit un bon rendement à travers l'opération de forage.

MOTS CLEFS :

Boue de forage, viscosité, contrainte, déformation, pertes de charges, concentration.

ABSTRACT :

Our study aims to demonstrate the evolution in an experimental manner rheological Features mud drilling an based oil in the Oil drilling on the change of concentration, as well as the influence of the latter on the rheological behaviour, and lost loads, more than that, in determining the best model to adapt to the flow of the mud.

The results can improve the mud drilling, to give the shaft a good performance throughout the drilling process.

KEY'S WORDS:

Mud drilling, viscosity, shear stress, shears rate, friction, concentration.

Tableau des indices

X	: tonnes d'alourdissant à ajouter par mètre cube de boue.....	kg/ m ³
df	: densité finale à obtenir.....	sans unité
di	: densité initiale de la boue à alourdir.....	sans unité
da	: densité de l'alourdissant.....	sans unité
V	: mètre cube de fluide d'allègement à ajoute par mètre cube de boue.....	m ³
Q ₂	: volume non connu de filtrat après T ₂ minutes recherchées.....	m ³
Q ₁	: volume connu de filtrat après T ₁ minutes connues.....	m ³
Pb	: densité boue x 1000.....	sans unité
Pe	: pourcentage eaux x 10.....	%
Ph	: (pourcentage huile x 10) x 0.80.....	%
Vs	: pourcentage solides x 10.....	%
Dsi	: densité des solides insolubles.....	sans unité
Psd	: poids du sel dissous en grammes.....	g
0.80	: densité de l'huile.....	sans unité
Vsd	: pourcentage du sel dissous en centimètre cubes.....	%
τ	: représente une force par unité de surface.....	N/m ²
dV	la variation de la vitesse entre l'épaisseur des couches limites (de).....	m ² /s
μ	: viscosité.....	Pa.s
μ _{app}	viscosité apparente	Pa.s
μ _{lim}	: viscosité limite	Pa.s
γ	: la vitesse de déformation.....	1/s
M	: moment du couple appliqué.....	N.m
R	: rayon maximal du cône.....	m
α	: Angle du cône.....	rad
ω	: Vitesse angulaire relative de 2 disques.....	trs/min
H	: l'entrefer ou la hauteur de l'éprouvette.....	m
Q	: debit.....	m ³ /s
P	: pression	Pascal
ΔH	: perte des charges.....	m

Listes des figures

Fig. II.1 : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.....	23
Fig. II.2 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.....	24
Fig. II.3 : Rhéogrammes des fluides newtoniens (- - -) et non newtoniens (-----).....	26
Fig. II.4 : Viscosités des fluides newtoniens (- - -) et non newtoniens (-----).....	26
Fig. II.5 : Rhéogrammes des principales catégories de fluides sans contrainte critique.....	27
Fig. II.6 : courbe d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique.....	29
Fig. II.7 : Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à vitesse de cisaillement imposée (a) ou à contrainte de cisaillement imposée (b).....	31
Fig. III.1 : Différents types de balances a boue.....	36
Fig. III.2 : Entonnoir de marsh.....	37
Fig. III.3. Rhéomètre FANN 32.....	38
Fig. III.5 : Différents appareils d'essai de filtration a basse pression.....	41
Fig. III.6 : Appareil d'essai de filtration a haute température et haute pression.....	41
Fig. III.7 : Géométrie de mesure.....	43
Fig. III.8 : Rhéomètre à cylindres coaxiaux.....	45
Fig. IV.1 : Rhéomètre AR2000.....	53
Fig. IV.2 : Rhéomètre FANN 32.....	54
Fig. V.1.a : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI pour différentes concentrations.....	60
Fig. V.1.b : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI pour différentes concentrations.....	61
Fig. V.2 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue BASP pour différentes concentrations.....	61
Fig. V.3 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI pour différentes concentrations.....	62
Fig. V.4 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue BASP pour différentes concentrations.....	62
Fig. V.5 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue AVA pour différentes concentrations.....	63
Fig. V.6 : Rhéogramme $\mu=f(\gamma)$ de la boue MI pour différentes concentrations.....	64
Fig. V.7 : Rhéogramme $\mu=f(\gamma)$ de la boue BASP pour différentes concentrations.....	65
Fig. V.8 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP initial.....	66
Fig. V.9 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour une concentration de 1g/l.....	66
Fig. V.10 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour 2g/l.....	67
Fig. V.11 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour 3g/l.....	67
Fig. V.12: Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI, BASP et AVA initial.....	68
Fig. V.13 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI, BASP et AVA pour 1 g/l.....	68
Fig. V.14 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI, BASP et AVA pour 2g/l.....	69
Fig. V.15 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI et AVA pour 3g/l.....	69
Fig. V.16 : Rhéogramme $\mu=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP initial.....	70
Fig. V.17 : Rhéogramme $\mu=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour 1g/l.....	71
Fig. V.18 : Rhéogramme $\mu=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour 2g/l.....	71
Fig. V.19 : Rhéogramme $\mu=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour 3g/l.....	72
Fig. V.20 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue BASP pour différents rapports huileux.....	73
Fig. V.21 : Courbe $\Delta h=f(Q)$ de la boue AVA pour différentes concentrations.....	74
Fig. V.22 : Courbe $\Delta h=f(Q)$ de la boue MI pour différentes concentrations.....	74
Fig. V.23 : Courbe $P=f(Q)$ de la boue AVA pour différentes concentrations.....	75
Fig. V.24 : Courbe $P=f(Q)$ de la boue MI pour différentes concentrations.....	75

SOMMAIRE

Introduction

Chapitre I : GENERALITES SUR LES BOUES DE FORAGES

I- Historique.....	1
II - Principales fonctions des boues de forages.....	2
III- Les différents types de boues.....	4
1- Introduction.....	4
2- Boues a phase continue eau.....	4
3 - Boue a phase continue huile.....	7
IV- Caractérisation physiques des boues.....	8
1- Densité et masse volumique.....	8
2- Filtration et cake.....	10
3- Concentration en sable.....	12
4 - Concentration en solides, en eau et en huile.....	12
V- Caractéristiques chimiques des boues.....	15
1- Notions de chimie analytique.....	15
2- Recherche quantitative des ions.....	16
3- Recherche qualitative des ions.....	21

Chapitre II : RHEOLOGIE DES FLUIDES : PARTIE THEORIQUE

Introduction.....	23
II- Mouvement laminaire de cisaillement.....	23
II.1 Définition.....	23
II.2 Contrainte de cisaillement.....	24
II.3 Déformation et vitesse de cisaillement.....	25
II- Mode de mesure et typologie de l'écoulement.....	26
1- Rappels.....	26
2- Typologie de l'écoulement.....	27
3- Mesures en mode dynamique : détermination de la viscoplasticité.....	32

Chapitre III : RHEOLOGIE DES BOUES DE FORAGE

Introduction.....	35
1- Appareillage de préparations et de mesures employées.....	35
1.a- Appareillages de préparation.....	35
1.b- Rhéomètres existants.....	42
II- Comportement rhéologique de la boue.....	45
II.1 Comportement rheofluidifiant.....	46
II.2 Comportement plastique.....	46
II.3 Comportement thixotrope.....	47
II.4 Comportement viscoélastique.....	47

SOMMAIRE

Chapitre IV : ETUDE EXPERIMENTALE

1- Introduction.....	49
2- Présentation des échantillons.....	50
2.1- Formulation.....	50
2.2- Définition de chaque composant de la boue.....	51
2.3- Préparation de la boue.....	52
3- Matériel utilise.....	52
4- Expérimentation pour les mesures rhéologiques.....	54
5- Expérimentation pour les mesures hydrauliques.....	55

Chapitre V : INTERPRETATION DES RESULTATS

Introduction.....	60
Résultats d'essais et interprétation.....	61
1- Lois rhéologiques en fonction de la variation de la concentration en g/l.....	61
2- Variation de la viscosité en fonction de la concentration.....	64
3- Comparaison entre les trois échantillons boues.....	67
4- Caractéristiques rhéologiques en fonction de la variation du rapport huileux o/w.....	74
5- Variation des pertes de charges en fonction de la variation de concentration.....	74

Conclusion

Bibliographie

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'industrie pétrolière est une grande consommatrice de fluide « intelligents » ou stimulables, c'est-à-dire dont les propriétés macroscopiques (rhéologiques, aux interfaces, etc....) peuvent être modulées réversiblement via des paramètres externes (température, pression, cisaillement...). A ce titre, ces fluides interviennent dans trois grandes étapes :

- La construction du puits. Elle est accomplie à travers la formation rocheuse à l'aide d'une tête rotative et d'un fluide de forage (la boue).
- La stimulation du réservoir. Une fois le puits construit, la production d'hydrocarbure peut être considérablement limitée par la faible perméabilité naturelle de la roche ou par la diminution de cette perméabilité causée par l'endommagement de la roche au cours du forage. La formation de fractures hydrauliques est l'un des procédés de stimulation du réservoir les plus utilisés pour surmonter les limitations de la production.
- La récupération du pétrole : La plupart de la production d'hydrocarbure est assurée en balayant le réservoir avec de l'eau pour déplacer ou « pousser » l'hydrocarbure vers le puits de production. Toutefois, avec sa faible viscosité, l'eau passe préférentiellement à travers les chemins de forte perméabilité et une grande quantité d'hydrocarbure est ainsi laissée dans la formation rocheuse. Un des enjeux de la récupération du pétrole est alors de pouvoir bloquer ces zones de forte perméabilité pour permettre une production accrue de pétrole en provenance des zones de plus faible perméabilité.

Les fluides pourront par exemple présenter une viscosité importante au repos tout en étant très facilement pompables. Les structures chimiques mises en oeuvre et les champs d'application dans le domaine pétrolier sont multiples.

Cette étude est faite pour déterminer le meilleur modèle rhéologique qui puisse s'adapter aux boues de forages à base d'huile. Elle se compose en deux parties, la première théorique, et la deuxième expérimentale.

1^{ère} partie :

Ce compose de trois chapitres :

- Chapitre I : Introduction sur les boues de forages, composée d'une historique et des principales fonctions de la boue, en plus des différents types de boue (huile, eau, gaz).
- Chapitre II : La rhéologie générale, avec toutes les définitions de contraintes, déformations, viscosité, et les différents modèles rhéologiques.
- Chapitre III : La rhéologie des boues de forages, avec les différents comportements rhéologiques des boues et le matériel de préparations des boues.

INTRODUCTION

2^{ème} partie :

Ce compose en deux chapitres :

- Chapitre IV : Etude expérimentale, qui donne les trois formulations de boues et le rôle de chaque produit, aussi que les modes opératoires des essais
- Chapitre V : Interprétation des résultats.

Dans le cadre de ce travail, l'objectif est de développer un fluide utilisé durant l'étape de construction du puits et qui doit présenter un seuil d'écoulement. Nous justifions dans la suite l'intérêt qu'a l'industrie pétrolière à disposer de tels systèmes et nous détaillons le plan de notre étude.

Chapitre I :

**INTRODUCTION SUR LES
BOUES DE FORAGES**

I)- HISTORIQUE

C'est sur le champ de spindletop, près de Beaumont (Texas), que la boue de forage fut utilisée pour la première fois par le capitaine Lucas. Cependant, l'évolution s'est faite au fur et à mesure des problèmes rencontrés et des possibilités de la technique et, bien avant 1901, on utilisait déjà un mélange d'eau et d'argiles.

On peut diviser l'histoire de la boue en quatre périodes :

- Avant 1901 : période artisanale.
- De 1901 à 1928 : période empirique.
- De 1928 à 1955 : période expérimentale.
- A partir de 1955 : période technique.

Avant 1901, les fluides de forage étaient constitués essentiellement d'eau et l'on n'attachait aucune importance. Le capitaine Lucas passe pour être le premier homme qui s'intéressa à la constitution de la boue. Cependant, jusqu'en 1928, la littérature est pauvre en articles concernant la boue et il semble que jusqu'à cette époque on n'attacha d'importance qu'à la densité (mesurée par peser directe à l'aide d'une balance ordinaire), à la viscosité (appréciée visuellement) et à l'eau libre surnageante. Mais déjà en 1920, on utilisait le sulfate de baryum pour alourdir les boues et s'opposer aux éruptions d'huile ou de gaz.

A partir de 1928, de nombreux chercheurs se penchent sur l'étude expérimentale des fluides de forage et les progrès deviennent très vite sensibles. La première société de services de boues se crée aux Etats-Unis.

- En 1929, on commence à employer les bentonites pour augmenter la viscosité et on emploie les phosphates pour la diminuer.

- En 1930 et 1931, le viscosimètre Marsh fait son apparition sur les chantiers et le viscosimètre Stormer dans les laboratoires.

L'emploi du tanin de Quebracho commence à se généraliser et la boue au silicate de soude est employée pour forer les argiles gonflantes.

- En 1935, les premiers élutriomètres permettent de mesurer la concentration en sable de la boue et la première boue à l'huile est utilisée pour forer une zone productrice.

- En 1936, l'attapulgite est employée pour augmenter la viscosité des boues salées. La division Production de l'A.P.I édite un manuel contenant les recommandations pour tester les boues de forage.

- En 1937, apparaît la première balance à boue (construit par P.H.Jones) qui détrônnera progressivement l'hydromètre. L'amidon de maïs est introduit sur le marché et employé comme réducteur de filtrat. En même temps, les premiers filtres-presses commencent à se généraliser.

- En 1944 apparaît la carboxyméthylcellulose (CMC) comme réducteur de filtrat non fermentescible.

- En 1945, emploie pour la première fois, comme réducteur de viscosité, les lignosulfonates de calcium et les lignines. Les premières boues à la chaux sont mises au point et vont influencer pendant plus de 15 ans, avec l'ion calcium, toute la technologie des boues.

- En 1949, apparaît le viscosimètre Fann qui facilitera la mesure des caractéristiques rhéologiques des boues de forage.

- En 1955, la mise au point des lignosulfonates de ferrocrome permet l'emploi de la boue au gypse qui va progressivement détrôner la boue à la chaux.

A partir de 1955, les progrès sont très rapides et les produits dont on dispose actuellement permettent de faire face à peu près à tous les problèmes.

II) - PRINCIPALES FONCTIONS DES BOUES DE FORAGES

En fonction de sa composition la boue doit remplir différentes fonctions :

- **Nettoyage du trou**

La boue doit débarrasser le trou des formations forées qui se présentent sous forme de débris appelés plus couramment “cutting”. Mais, si la boue doit transporter ces débris du fond du trou jusqu’en surface, elle doit être aussi capable de les maintenir en suspension lors des arrêts plus ou moins longs de la circulation.

L’aptitude de la boue à entraîner les “cutting” dépend de sa viscosité et de sa densité, ainsi que de sa vitesse de circulation dans l’espace annulaire. Si viscosité et densité relèvent des produits employés, il n’en va pas de même de la vitesse de remontée qui dépend du débit des pompes à boue, du diamètre de forage et du diamètre du train de soude.

Pendant longtemps on a pensé que seul un fluide possédant des gels élevés était capable de s’opposer à la sédimentation des débris ou de l’alourdissant dans le trou. Cette opinion ne prévaut plus et il est actuellement facile de fabriquer des boues à gels nuls sans risques de sédimentation.

- **Refroidissement et lubrification de l’outil et du train de soude**

La circulation de boue refroidit l’outil et le train de soude. Mais si le fluide est capable de lubrifier plus ou moins bien l’outil dans des conditions normales de travail, il lui est parfois difficile de s’opposer à l’usure rapide des roulements des molettes. Généralement, on améliore les qualités de lubrification par addition d’huile émulsionnée dans la phase aqueuse. Cette technique n’a toutefois pas toujours donné les résultats escomptés et cela a conduit à la mise au point de produits anti-friction et extrême –pression qui fonctionnent par dépôt d’un film capable de réduire considérablement les coefficients de frottement et par conséquent de prolonger la vie des outils, du train de forage et de toutes les pièces métalliques en mouvement.

- **Prévenir le cavage et les resserrements des parois du puits**

La boue doit posséder des caractéristiques physiques et chimiques telles que le trou conserve un diamètre voisin du diamètre nominal.

Le cavage est causé par des éboulements, par la dissolution du sel si la boue n’est pas saturée en Na Cl, par la dispersion des argiles si les alcalinités sont exagérément élevées, etc. .

Les resserrements ont souvent pour cause une insuffisance de la pression hydrostatique de la colonne de boue qui ne peut équilibrer la pression géodynamique des roches. Le remède consiste à augmenter la densité.

Certains resserrements sont dus à des formations gonflantes (craies, argiles) et sont généralement causés par des valeurs de filtrations trop élevées.

Le remède consiste à réduire le filtrat et à modifier la composition électrolytique de la phase aqueuse.

Signalons aussi que certains resserrements sont causés par une épaisseur excessive du cake. Le remède consiste à réduire le filtrat.

- **S'opposer aux venues d'eau, de gaz ou d'huile**

La pression hydrostatique doit contrebalancer la pression exercée par les fluides ou gaz contenus dans les formations forées. Cependant, en cas de débit des couches, la boue doit supporter relativement bien la contamination, sans variation brutale des caractéristiques. Ainsi la boue doit posséder des gels suffisamment bas pour permettre un dégazage rapide en surface en cas de venues de gaz. D'autre part, cette pression ne doit pas être élevée au point de créer des pertes de boue dans le terrain.

- **Ne pas gêner les interprétations géologiques et électriques et ne pas causer de dommages à la production**

La boue ne doit pas altérer les cutting forés afin de permettre un examen géologique correct. Elle ne doit pas masquer les indices d'huile, par la présence d'extincteurs de fluorescences par exemple. La boue doit aussi être compatible avec le carottage électrique et ne pas endommager les formations productives.

- **Autres fonctions**

La boue doit favoriser la vitesse de pénétration de l'outil. En conservant de faibles teneurs en solides, la viscosité Marsh la plus basse et le filtrat le plus élevé. Bien entendu, ces caractéristiques devront être compatibles avec la sécurité et le prix de revient du forage. Signalons que dans certains terrains forés à l'aide d'outils à "jet", c'est la boue qui fore, l'outil ne fournissant qu'un travail de calibrage du trou. La présence de boue dans le puits diminue le poids apparent des tubages.

La boue ne doit pas être corrosive pour le matériel. Il existe un certain nombre d'inhibiteurs de corrosion surtout employés dans les boues salées saturées et dans les boues de packer.

Enfin la boue ne doit être ni abrasive ni toxique et ne doit pas présenter des risques d'incendie.

III)- LES DIFFERENTS TYPES DE BOUES

1- INTRODUCTION

Une nomenclature des types de boues d'après leurs constituants est certes pratique, mais elle rend assez mal compte du type d'équilibre recherché entre l'argile et la boue et des raisons pour lesquelles les produits sont ajoutés.

En toute logique, cette classification devrait reposer sur la nature de la réaction souhaitée entre la boue et l'argile. En pratique ceci se révèle assez difficile, car des effets souvent contraires sont recherchés, suivant qu'il s'agisse de l'argile des parois ou de celle dispersée mécaniquement dans la boue en cours de forage.

Par exemple une boue parfaitement inerte vis - à - vis des parois peut devenir d'un contrôle très malaisé l'argile dispersée dans la boue, étant aussi protégée. Devient insensible à tout traitement chimique. Inversement, un traitement très efficace sur l'argile dispersée (boue aux poly phosphates par exemple) pourra être abandonné si son action sur les parois devient excessivement néfaste.

Dans la pratique, il faudrait trouver un compromis qui permette à la fois un maintien correct des parois et un contrôle aisé des caractéristiques de la boue.

2- Boues à phase continue eau

2.1 - Boue bentonitique

2.1.1 Principe

Le constituant de base est la bentonite, à laquelle viendra s'ajouter l'argile forée. Lorsque le pourcentage de celle-ci devient trop élevé, certaines caractéristiques de la boue augmentent de façon excessive, notamment les gels, la yield-value et l'épaisseur du cake. Dans la plupart des cas, la boue de démarrage, donc en gros diamètre. Avec des avancements rapides et des pertes en surface importantes, impose de grosses fabrications journalières.

Cependant, occasionnellement, des traitements supplémentaires pourront être faits avec des phosphates, de la C.M.C, du tanin ou du F.C.L.

Ceci ne constitue pas à proprement parler de nouveaux types de boues puisque ce sont des traitements strictement curatifs, s'appliquant sur une argile déjà dispersée.

De plus, ce genre de traitement est limité dans le temps en efficacité et en rentabilité et permet surtout d'atteindre la cote de conversion en un type de boue plus élaboré.

2.1.2 Boue aux phosphates

L'ajout de poly phosphates à une boue bentonitique permet de « casser » de façon spectaculaire la yield-value et les gels en neutralisant les charges électriques latérales des grains d'argile ' fitting '. Par ailleurs, les poly-phosphates vont avoir un rôle anticalcique, leurs sels de calcium étant insolubles.

2.1.3 Boue au tanin- soude (où F.C.L.- soude)

L'ajout de tanin ou F.C.L. à une boue très chargée en argile va avoir un effet remarquable sur la thixotropie et la plasticité. Par ailleurs, le filtrat va être amélioré de façon très sensible.

L'ajout de soude en faible quantité (2 ou 4 parties de tanin ou F.C.L. pour une partie de soude) permet avant tout de solubiliser le tanin, de neutraliser son acidité et de créer une légère alcalinité propice à la disparition du bullage. Il ne s'agit donc pas ici, bien que les composants soient les mêmes, de boue « rouge à haut pH » dont le principe et le contrôle sont bien différents.

2.1.4 Boue (blanche) à la C.M.C.

De faibles quantités de C.M.C. technique permettent de défloculer une boue de ce type qui a été légèrement contaminée. Thixotropie et filtrat seront alors nettement améliorés. La C.M.C. à donc ici avant tout un rôle de colloïde protecteur.

2.2 - Boues à haut pH

Le contrôle des boues à « haut pH », c'est-à-dire les boues rouges, les boues à la chaux et les boues au gypse, repose sur le même principe.

Régulation de l'échange $Ca \rightarrow Na$ dans l'argile en contrôlant la solubilité du Ca^{++} dans la boue par ajout d'alcalins.

Entre la boue rouge à haut pH qui est essentiellement sodique et la boue au gypse dont le milieu est plus calcique, la boue à la chaux permet, en principe, une certaine continuité dans les variations du rapport Na sur Ca.

L'idée initiale est de travailler avec une boue dont l'équilibre Na - Ca soit comparable à celui de l'argile forée et de supprimer ou limiter ainsi l'échange de cations. A partir de là, la technique a évolué dans deux voies en déplaçant l'équilibre dans le sens favorable :

- Soit à la stabilisation des parois : durcissement Calcique par exemple ;
- Soit à un accroissement de la résistance de la boue à la charge argileuse.

En réalité, il est admis aujourd'hui que la présence d'un pH très élevé entraîne une fragilisation de l'argile beaucoup plus gênante que celle résultant des phénomènes d'échange de cations, et qu'il est illusoire d'espérer ainsi stabiliser un puits fragile.

Actuellement, cet inconvénient a été minimisé en travaillant avec les alcalinités minimales (boue à faible teneur en chaux, boue au gypse) ce qui a permis de conserver les avantages spécifiques de ces types de boues : stabilité et résistance à la charge argileuse.

- Boue rouge à haut pH
- Boue à la chaux
- Boue au gypse

2.3 - boue salée saturée

Ces boues sont utilisées pour éviter le cavage du sel foré. Leur teneur en Na Cl est telle que l'argile s'y trouve dispersée essentiellement sous forme sodique, bien qu'il y ait souvent une teneur en Ca^{++} soluble importante (2 000 à 40 000 mg/l sont courants au Sahara). Dans les conditions normales, la chaux ajoutée est sans effet sur les réactions d'échange de base et agit seulement par adsorption sur la surface de l'argile, modifiant par là forme et hydratation (eau d'imbibition) de la particule et donc la rhéologie et filtrat de la boue. Un excès de chaux (traitement trop rapide ou trop important, reforage ciment) amorce l'échange de base, signalé par l'apparition d'un Pf non nul, et l'augmentation du filtrat. Ensuite, toutes choses égales par ailleurs, le calcium diminuera. Ce fait montre bien que la présence de CO_3^{--} (Pf différent de zéro) est nécessaire à l'échange de base et qu'une haute teneur en calcium n'est pas suffisante. Cette alcalinité constante une contamination par l'eau $Ca Cl_2$ seule est relativement peu sensible, bien que les teneurs en calcium dépassent souvent 2 0000 mg/l.

Hors du Sahara, les argiles peuvent se comporter différemment et ne supporter que des teneurs en calcium bien plus faibles. La soude contrôlera alors la solubilité du Ca^{++} et il pourra apparaître un Pf différent de zéro, sans modification des caractéristiques de la boue, à condition que le Ca^{++} soit très faible.

2.4 - Boues à la dérivée ligneuse

Les dérivés ligneux (lignosulfonates de ferrochrome, lignine chromée, humate de chrome) sont ajoutés non plus tellement pour leurs propriétés fluidifiantes, mais bien pour inhiber le gonflement de la dispersion des argiles des parois et de la boue. Il s'agit donc essentiellement d'un rôle préventif.

Les dérivés ligneux agissent en se liant à l'argile qu'ils vont protéger en bloquant l'échange de base et fragilisation par OH. Cette protection (les Américains parlent d'encapsulation) n'est efficace que dans certaines conditions :

- Teneur en dérivés ligneux adaptée à la réactivité de l'argile (plus l'argile est réactive, plus la teneur doit être élevée).
- Nature et force ionique du milieu permettant la solubilisation des produits ligneux. En particulier, en milieu salé saturé, l'inhibition peut être rompue par un excès de Pf et de calcium soluble.

Il faut cependant signaler que, si une inhibition parfaite est presque toujours favorable à la tenue des parois, elle peut entraîner à la longue des difficultés de contrôle des caractéristiques des boues.

En effet, il y a toujours, quel que soit le type de boue, une dispersion strictement mécanique de l'argile. Sur celle-ci, l'inhibition excessive peut rendre inopérants les traitements fluidifiants classiques. Thixotropie et plasticité peuvent alors devenir telles que l'inhibition doit être limitée soit en diminuant la teneur en dérivés ligneux, soit en modifiant la force ionique du milieu.

- Boue douce au F.C.L. /L.C.
- Boue salée au F.C.L. /L.C.

2.5 - Boue à l'eau de mer

L'eau de mer a une salinité de 32 à 35 g/l et des teneurs importantes en calcium et en magnésium (respectivement 0,4 et 1,3 g/l).

Exceptées les boues salées saturées à base d'eau de mer. Elles ont évidemment un comportement identique à celui des boues salées classiques. Deux types de boues spécifiques sont utilisés :

- Boue de démarrage
- Boue F.C.L/L.C. à l'eau de mer

3 - Boue à phase continue huile

3.1.- Boue à l'huile (type Ken Flo)

Indépendamment des avantages qui peuvent en être retirés pour la productivité des puits, ces boues ont l'intérêt de présenter une phase continue huile sans affinité avec l'argile, qui ainsi ne subit plus les phénomènes d'hydratation, d'échange de base, etc.

Ces boues sont constituées essentiellement de :

- Une huile de base, dont les spécifications dépendent de l'émulsifiant utilisé et des caractéristiques finales requises pour la boue

Pour le Ken Flo les spécifications moyennes sont :

Huile asphaltique (brut, fuel lourd)

Densité entre 0,91 et 0,96

Point éclair supérieur à 80.

- Un émulsifiant. Pour le Ken Flo le "super concentré" est utilisé à la dose de 70 à 90 l/m³. Cet émulsifiant est saponifié au moment de l'emploi par de la chaux vive (20 à 40 kg/m³).

3.2- Boue à émulsion inverse (type Ken X)

Cette boue présente à peu près les mêmes avantages que la boue à l'huile, puisque l'eau s'y trouve sous forme d'émulsion et n'entre pas en contact, en principe, avec l'argile. Ceci n'est pas absolument rigoureux, puisque par exemple en forage dans le sel, la phase eau de la boue se sature progressivement. De toute façon, ce contact eau – argile est limité et ne peut se réaliser que très lentement. Comparée avec celle constatée en boue à l'eau, l'hydratation de l'argile en boue à l'huile sera extrêmement réduite ; ceci sera particulièrement sensible sur les cuttings qui n'ont qu'un temps de séjour réduit dans la boue.

- Composition (Exemple)

Huile de base (Brut ou gas-oil)	500 à 700 l
Ken X n°1	30 l
Ken X n°2	5 l
Ken X n°3A	15 l
Chaux vive	40 kg
Eau douce Ou saumure saturée au Na Cl Ou saumure à 40 g/l Ca Cl ₂	500 à 300 l.

Les teneurs en concentrés n°1, n°2, n°3A doivent être adaptées à l'huile de base utilisée, à la charge en solides prévue (argile et baryte) et aux températures de fond estimées.

IV)- CARACTERISATION PHYSIQUES DES BOUES

1- DENSITE ET MASSE VOLUMIQUE

1.1. Définitions

- La densité est le rapport de la masse volumique d'un corps à la masse volumique d'un corps de référence dans des conditions qui doivent être spécifiées pour les deux corps (l'eau à 4°C pour les liquides et les solides et l'air pour les gaz). Elle s'exprime par un nombre sans dimension.

- La masse volumique est le rapport de la masse d'un corps à son volume dans des conditions définies de pression et température. Elle s'exprime en grammes par centimètre cube ou en kilogrammes par mètre cube dans le système décimal.

Dans les pays anglo-saxons, la densité s'exprime par le même nombre sans dimension que chez nous et se nomme "specific gravity". Par contre, la masse volumique appelée "Weight" ou "Density" s'exprime par des unités différentes et qui sont les livres par gallon et les livres par pied cube.

La densité des boues de forage se mesure à l'aide d'un densimètre dont le principe est analogue à celui de la balance romaine à curseur. Ces densimètres permettent de lire directement les densités (ou specific gravity) ou les masses volumiques (Density) en livres/gallon et livres par cubic/feet et les pressions exercées par la colonne de boue en PSI pour 1 000 feet.

Dans la pratique, il en utilise le "point" qui est le centième d'unités de densité.

L'alourdissement des boues s'effectue généralement à l'aide de sulfate de baryum ou barytine, à l'aide de carbonate de calcium ou à l'aide de sulfure de plomb ou galène.

La dissolution du Na Cl se fait avec changement de volume et la densité de la solution ne peut se calculer avec précision à l'aide des concentrations et densité de chacun des composants. La densité du sel dissous est voisine de 2.7 pour l'eau de mer et les saumures saturées.

1.2 Alourdissement

Avant d'alourdir une boue il faut d'abord connaître le tonnage d'alourdissement nécessaire, ce qui peut être déterminé par la formule simple suivante ou l'abaque :

$$X = \frac{df - di}{da - df} da$$

Ou :

X : tonnes d'alourdissant à ajouter par mètre cube de boue.

df : densité finale à obtenir

di : densité initiale de la boue à alourdir

da : densité de l'alourdissant.

L'addition d'alourdissant dans une boue augmente le volume de boue et il faudra s'assurer que l'on dispose de suffisamment de place dans les bacs de stockage. On le calculera comme suit :

Augmentation de volume en mètre cubes = tonnes d'alourdissant/densité de l'alourdissant

Une règle pratique de chantier permet de calculer le tonnage de barytine comme suit :

- Nombre de points en densité à gagner x 17 = kg de barytine à ajouter dans 1 m³ de boue.

Exemple : Pour porter la densité de 1.40 à 1.50 soit 10 points à gagner on multipliera 10x17=170kg de barytine à ajouter par mètre cube de boue.

1.3 Allègement

Il est parfois nécessaire de diminuer la densité d'une boue par addition d'eau, d'huile ou de boue.

Le volume de fluide d'allègement peut être déterminé par le calcul suivant :

$$V = \frac{di - df}{df - da}$$

Ou :

V : mètre cube de fluide d'allègement à ajoute par mètre cube de boue

di : densité initiale de la boue à alléger

df : densité finale à obtenir

da : densité de fluide d'allègement

1.4 Rôle de la densité

- La densité est un paramètre important des boues de forage. Elle doit être suffisamment élevée pour que la pression hydrostatique exercée par la boue sur les formations empêche les venues d'eau, d'huile et de gaz et par conséquent les éruptions. Il ne faut pas qu'elle dépasse la limite de résistance des roches pour ne pas les fracturer et amener des pertes de circulation.

Un accroissement de la densité pendant le forage de terrains argileux ou marneux est un indice de l'enrichissement de la boue en solides.

Une diminution de densité non consécutive à un ajout d'eau est l'indice d'une venue d'eau, de gaz ou plus rarement d'huile. Ceci peut être aussi la conséquence d'une prise d'air

(Fuites aux aspirations des pompes) ou d'un déséquilibre chimique (dans le cas des fluides traités aux dérivés ligneux) causant un micro bullage de la boue. Il faut réagir très vite lorsque la densité d'une boue diminue et effectuer le traitement correcteur adéquat.

- pression exercée par la boue sur les parois du puits

Pour calculer la pression **p**, exercée par une boue de densité **d**, à une profondeur **h**, on appliquera la relation :

$$P = \frac{h \times d}{10}$$

h étant exprimé en mètres et P en kilogrammes par centimètre carré.

Par exemple, une boue de densité 1.3 exercera à 1250 m une pression :

$$P = \frac{12500 \times 1.3}{10} = 162.50 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

- Calcul de la densité en fonction de la pression requise

La pression requise au droit des formations doit être égale à la pression connue ou présumée de la formation, augmentée d'une marge de sécurité de 0.03 à 0.05 point de densité. Pour calculer la densité nécessaire connaissant la pression, on appliquera la réaction :

$$\text{Densité} = \frac{\text{pression de formation} \times 10}{\text{profondeur}}$$

- densités employées

Les densités couramment employées dans les forages varient entre 0.9 et 2.40. Le forage avec des boues à densité supérieure à 2.40 est extrêmement rare, étant donné que généralement les roches sédimentaires ne supportent pas des densités supérieures sans craquer.

2 – FILTRATION ET CAKE

2.1- Définitions

Lorsque la boue se trouve au contact des parois plus ou moins perméables du trou, la partie liquide filtre dans la formation en déposant sur les parois sa partie solide que l'on appelle "cake".

Dans un puits, on a affaire à deux types de filtration : la filtration dynamique qui se produit lorsque le fluide est en circulation et la filtration statique qui se produit lorsque le fluide est immobile et ne circule pas.

Il est extrêmement important de connaître les caractéristiques de filtration.

En effet, les hauts filtrats peuvent déliter les formations délicates (argiles, marnes) et favoriser les éboulements. De plus, le cake déposé peut être épais au point d'empêcher le passage du tricône lors des manœuvres de chargement d'outils.

Il existe un appareil standard employé universellement sur les chantiers pétroliers et qui permet de déterminer le filtrat des boues en statique.

2.2- loi de la filtration

- Influence du temps de filtration

Le filtrat double lorsque le temps quadruple, ce qui veut dire que le débit est proportionnel à la racine carrée du temps.

Ainsi, si l'on recueille 7 cm³ de filtrat en 7 mn 1/2, on recueillera 7x2=14 cm³ en 30 mn. Mathématiquement le débit répond donc à l'équation suivante :

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$$

Ou :

Q₂ : volume non connu de filtrat après T₂ minutes recherchées

Q₁ : volume connu de filtrat après T₁ minutes connues

Et dans l'exemple ci-dessus :

$$Q_2 = 7 \sqrt{\frac{30}{7\frac{1}{2}}} = 7 \times 2 = 14 \text{ cm}^3$$

- Influence de la pression de filtration

En supposant le cake incompressible (ce qui n'est pas le cas) le débit est proportionnel à la racine carrée de la pression différentielle. En fait, la pression modifie la porosité et la perméabilité du cake. Pour une boue possédant un support colloïdal valable, le fait de doubler la pression accroîtra le filtrat de 5 à 15% seulement. Nous signalons cependant que très rarement un "support colloïdal valable". Seule une bonne bentonite peut remplir ce rôle.

- Influence de la température

Le débit est inversement proportionnel à la racine carrée de la viscosité de la phase fluide. Mathématiquement, le débit obéit à l'équation suivante :

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{V_1}{V_2}}$$

Ou :

Q₂ : volume non connu de filtrat à viscosité recherchée (V₂) de la phase fluide à température recherchée

Q₁ : volume connu de filtrat à viscosité (V₁) de la phase fluide à température connue.

2.3- Influence du lit filtrant

L'emploi de bentonite est indispensable pour permettre un contrôle aisé des caractéristiques de filtration et ceci est dû à la constitution minéralogique de ce colloïde et à sa répartition granulométrique.

En principe, un fluide à base d'eau devrait contenir en permanence au moins 40 à 50 kg/ m³ de bentonite.

- Rôle du filtrat

L'importance du filtrat est considérable dans le forage d'un puits. Le filtrat doit être suffisamment élevé pour augmenter la vitesse d'avancement ;

- Suffisamment bas pour ne pas déliter ou faire gonfler les formations argileuses et marneuses et pour éviter les collages du matériel tubulaire en face des zones perméables (calcaires, dolomies, grés, etc.) ;

- Il ne doit pas envahir les formations productives, occasionner des émulsions avec l'huile en place ou modifier la porosité et la perméabilité de ces formations, etc. .

Fixer le filtrat que doit posséder une boue est un problème délicat qui nécessite une grande connaissance des problèmes et des objectifs de forage. Disons simplement que des filtrats de 20 à 30 cm³ en 30mn sont courants en démarrage du forage et que des valeurs de 2 à 3 cm³ sont courantes en fin de forage. Des valeurs inférieures à 2 cm³ ne paraissent pas économiquement rentables dans les boues à base d'eau (dans les boues à l'huile, on obtient couramment zéro de filtrat).

3- CONCENTRATION EN SABLE

3.1- Définition et importance de la teneur "sable"

On appelle "sable", en terminologie boue, les particules qui ne passent pas sur un tamis de 200 mesh Tyler, c'est-à-dire les particules dont le diamètre est supérieur à 0.074 mm. Des particules inférieures à 0.074 mm (74 microns) sont appelées "silt"

La présence de sable dans une boue a un effet abrasif sur toutes les pièces en mouvement et en particulier sur les chemises et pistons des pompes ainsi que sur les outils.

De plus, à concentration élevée, le sable augmente la densité de la boue et peut sédimenter dans le trou pendant les arrêts de circulation risquant d'occasionner des coincements.

Il est recommandé de maintenir la teneur en sable à moins de 1% en volume dans la boue, ceci par dessablage du fluide dans des cyclones appropriés et par sédimentation dans des bacs de décantation.

3.2- Mesure du sable

Un appareil simple constitué par un tamis de 200 mesh muni d'un entonnoir et d'un élutriomètre en pyrex gradué directement en pourcentage en volume permet de connaître à tous moments la teneur en sable de la boue.

4 - CONCENTRATION EN SOLIDES, EN EAU ET EN HUILE

La connaissance de la concentration en solides, en eau et en huile est d'une importance considérable dans les boues alourdis et dans les boues émulsionnées.

Pour déterminer les pourcentages en volume de ces différents constituants, on emploie un distillateur à boue dont le principe est le suivant :

On chauffe un certain volume de boue (20 cm³ en général). La vapeur passe dans un condenseur et on récupère l'eau et l'huile dans une éprouvette graduée en pourcentage. Par différence de densité l'huile surnagera au-dessus de l'eau. On effectue directement la lecture et on détermine la teneur en solides par différence, soit :

$$100 - \text{volume (eau + huile)}$$

On connaîtra ainsi les trois constituants de la boue (en volume) : l'eau pure, l'huile et les solides.

A partir de ces données, on pourra déterminer la concentration de la boue en argile et en baryte.

Pour cela, il faut d'abord calculer la densité des solides insolubles constitués par l'argile et la baryte (les sable, calcaires et autres sont assimilés à de l'argile, les densités étant sensiblement les mêmes), comme suit :

$$D_{si} = \frac{Pb - (Pe + Ph)}{V_s}$$

Ou :

Pb : densité boue x 1000

Pe : pourcentage eaux x 10

Ph : (pourcentage huile x 10) x 0.80

Vs : pourcentage solides x 10

Dsi : densité des solides insolubles.

Cette formule est valable pour les boues à l'eau douce ou à l'eau de mer et pour les boues à l'huile mais lorsque la boue est du type "sable saturée", il faut faire intervenir le volume et le poids du sel, celui - ci ne pouvant plus être considéré comme négligeable. La formule suivante sera appliquée :

$$D_{si} = \frac{Pb - (Pe + P_{sd} + Ph)}{V_s - V_{sd}}$$

Ou :

Pb : densité boue x 1000

Pe : pourcentage eaux x 10

Psd : poids du sel dissous en grammes

Ph : (pourcentage huile x 10) x 0.80

0.80 : densité de l'huile

Vs : pourcentage solides x 10

Vsd : pourcentage du sel dissous en centimètre cubes

Dsi : densité des solides insolubles.

On calcule P_{sd} comme suit :

$$P_{sd} = \frac{\text{Salinité en (g/l)}}{(\text{densité saumure x 1000}) \text{ salinité en (g/l)}} \times (\text{pourcentage deau x 10})$$

La salinité en grammes par litre est effectuée par dosage du Na Cl dans le filtrat (c'est une mesure courante de chantier).

La densité de la saumure est déterminée à l'aide d'une l'abaque.

On calcule V_{sd} comme suit :

$$V_{sd} = \frac{1000 - (\text{densité saumure x 1000}) \text{ salinité en (g/l)}}{(\text{densité saumure x 1000}) \text{ salinité en (g/l)}}$$

On voit que lorsque la salinité de la boue dépasse sensiblement celle de l'eau de mer (35-40g/l), le calcul des solides insolubles devient plus vite long à effectuer.

Lorsque l'on a déterminé la densité des solides insolubles (argiles + barytine), on peut calculer le pourcentage en volume et le pourcentage en poids d'argile et de barytine, comme suit :

$$\text{Pourcentage argile en volume} = \frac{4,2 - D_{si}}{4,2 - 2,5} \times 100$$

$$\text{Pourcentage baryte en volume} = \frac{D_{si} - 2,5}{4,2 - 2,5} \times 100$$

$$\text{Pourcentage argile en poids} = \frac{\text{pourcentage argile en volume} \times 2,5}{D_{si}}$$

$$\text{Pourcentage baryte en poids} = \frac{\text{pourcentage baryte en volume} \times 4,2}{D_{si}}$$

Ou :

4,2 : densité de la barytine

2,5 : densité de l'argile

D_{si} : densité des solides insolubles.

Afin d'éviter les calculs fastidieux, des diagrammes ternaires ont été tracés permettant de déterminer rapidement, après distillation, le pourcentage en volume d'argile et de barytine dans une boue douce et dans une boue salée saturée.

Sur la base du triangle, on pointe le pourcentage d'eau obtenu au distillateur. On trace une parallèle au côté droit du triangle, laquelle va couper la ligne des densités. A partir de ce point P on trace une parallèle à la base du triangle, laquelle va couper le côté gauche du triangle et indiquer le pourcentage d'argile en volume dans la boue. A partir du point P on trace à nouveau une parallèle au côté gauche du triangle, laquelle va couper le côté droit du triangle et indiquer le pourcentage en volume de baryte dans la boue.

Pour déterminer la concentration d'argile et de baryte dans 1 m³ de boue, on appliquera :

(Pourcentage argile en volume x 10)2,5 = kg/m³ d'argile
(Pourcentage baryte en volume x 10)4,2 = kg/m³ de barytine

On opère de la même façon qu'avec le diagramme ternaire pour boue douce avec la différence que la base du diagramme sera constituée par la deuxième échelle (eau).

- Alléger la boue grâce à la faible densité de l'huile (0,85).
- Imperméabiliser le cake et obtenir ainsi de plus faibles filtrats.
- Réduire la dispersion des argiles dans la boue et par là le volume des dilutions.
- Augmenter la durée de vie des roulements de l'outil par une meilleure lubrification de la boue.

Au-delà de 6 à 8 % d'huile, la viscosité de la boue augmente très vite (surtout avec les bruts) et le pouvoir lubrifiant très peu. Aussi si l'on désire accroître le pouvoir lubrifiant, est-il préférable d'ajouter un agent tensioactif à la concentration de 2 à 3 %.

V)- CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES BOUES

1- NOTIONS DE CHIMIE ANALYTIQUE

• Une solution est une phase formée de deux ou plusieurs espèces moléculaires qui ne se laissent pas transformer l'une dans l'autre : on les appelle composants de la solution.

• Le solvant est le corps qui dissout une substance, le soluté est la substance dissoute.

La concentration en soluté s'exprime par :

- a- En nombre de grammes de soluté par litre de solvant ;
- b- En nombre de grammes contenus dans un litre de solution : ceci est la forme la plus usuelle dans la technique des boues de forage ;
- c- En nombre de grammes pour 100g de solution (c'est le pourcentage en poids) ou en nombre de grammes pour 1 000 000g de solution (c'est la partie par million ou ppm utilisée par les Anglo-Saxons).

Exemple :

- 1 litre d'eau est saturé en Na CL par ajout de 358g de sel .le volume final est de 1.135litre qui pèse 1,135x1, 20=1,360kg.
- 1 litre de cette solution contient 318g de sel et pèse 1,000x1, 20=1,200kg.
- 1 kg de cette solution contient 265g de sel, ou 26,5% en poids, ou 265 000 ppm.

Volume d'eau	Poids de chlorure de sodium	Volume de solution	Poids de solution
1 litre	358 318 265 Ou 26,5% Ou 265 00 ppm	1,135 litre 1 litre	1,360 kg 1,200kg

• solution titrée

C'est une solution qui renferme par litre une concentration exactement comme d'un corps chimiquement pur.

Le titre d'une solution s'exprime en équivalent – gramme par litre de solution, c'est la normalité.

Le titre d'une solution est donc égal à :

$$T = \frac{P}{M}$$

Ou :

T : titre

P : masse de soluté en grammes

M : équivalent gramme de soluté.

Donc la masse P de soluté dans 1 litre de solution = M.T.

• Equivalent-gramme

C'est la masse atomique ou moléculaire divisée par le nombre de valences que cette substance met en jeu dans la réaction considérée.

- Exemple :

Pour connaître le titre que devra avoir une solution pour que 1 cm³ de celle-ci précipite 1g d'un corps donné, il faut diviser la normalité par l'équivalent-grammes de ce corps.

Ainsi, le titre d'une solution de Ag NO_3 pour que 1 cm^3 de celle - ci précipite d'1 g de Cl^- se détermine comme suit :

Masse atomique du $\text{Cl}^- = 35,5$

Valence du $\text{Cl}^- = 1$

Donc équivalent gramme = 35,5

$$\text{Titre} = \frac{1}{35,5} = 0,0282N$$

2- RECHERCHE QUANTITATIVE DES IONS

2.1- Mesure de l'alcalinité du filtrat

L'alcalinité du filtrat, ou pH, est due à la présence des ions carbonate, bicarbonate ou hydroxydes. Les silicates, les phosphates, les aluminates, les sulfates bisulfites et les bases organiques peuvent y contribuer mais à un degré moindre. Réactifs nécessaires :

- Solution titrée H_2SO_4 N/50
- Solution de phénophtaléine (virage à pH : 8,3)
- Solution de méthylorange (virage à pH : 4,4)
- Eau distillée privée de CO_2 par ébullition.

Ces étapes de mesuré de l'Alcalinité Pf du filtrat

Pipeter 1 cm^3 de filtrat et verser dans un bécher ou un Erlenmeyer. Ajouter 20 cm^3 d'eau distillée. Ajouter 2 ou 3 gouttes de phénophtaléine.

Si la couleur du filtrat ne change pas on a $\text{Pf} = 0$.

Si la couleur du filtrat devient rose, faire couler goutte à goutte à la burette le H_2SO_4 N/50 jusqu'à décoloration sous agitation du bécher à la main.

Pf est le nombre de centimètres cubes d'acide N/50.

Ces étapes de mesuré de l'Alcalinité Mf du filtrat

A l'échantillon précédent, ajouter 2 ou 3 gouttes de méthylorange, ce qui colore le filtrat en jaune. Faire couler goutte à goutte et en agitant le H_2SO_4 N/50 jusqu'à virage du jaune à l'orange.

Mf est le nombre total de centimètres cubes d'acide N/50 utilisé dans les deux opérations de décoloration.

- a- Si $\text{Pf} = 0$, il n'y a que des ions CO_3H^- dans le filtrat.
- b- Si $\text{Pf} = \text{Mf}$, il n'y a que des ions OH^- dans le filtrat.
- c- Si $2x\text{Pf} = \text{Mf}$, il n'y a que des ions CO_3^{--} dans le filtrat.
- d- Si $2x\text{Pf}$ est $>$ Mf, il y a présence d' OH^- et CO_3^{--} dans le filtrat.
- e- Si $2x\text{Pf}$ est $<$ Mf, il y a présence de CO_3^{--} et CO_3H^- dans le filtrat.

Dans le filtrat, il ne peut donc y avoir que : OH^- seul, ou CO_3^{--} seul, ou CO_3H^- seul, ou bien un mélange binaire comme en (d) ou (e).

Il ne peut jamais subsister $\text{OH}^- + \text{CO}_3\text{H}^-$ car ces deux ions entrent en réaction chimique pour donner : $\text{CO}_3^{--} + \text{H}_2\text{O}$.

Toutefois, l'emploi des boues aux lignosulfonates a permis de constater que les ions SO_3^{--} et CO_3H^- apportés par ces dérivés ligneux interfèrent dans le dosage et faussent totalement l'interprétation.

On se contente donc, dans ces types de boues, de doser Pf (sans s'occuper de Mf) et de mesurer le pH.

L'abaque de l'institut Français du Pétrole : "Boues de forage"(1), permet de déterminer la concentration en Na OH, Na₂CO₃ H, connaissant Pf et Mf.

2.2- Dosage quantitatif des chlorures dans le filtrat

• L'ion Cl⁻ est présent dans toutes les boues de forage. Il est apporté par le sel (Na Cl), le chlorure de calcium (Ca Cl₂), le chlorure de magnésium, etc. Ces sels détériorent les caractéristiques rhéologiques et de filtration des boues. Aussi le dosage des chlorures est – il particulièrement important et doit-il être effectué fréquemment afin de mieux connaître les causes de modification des caractéristiques du fluide.

Ces réactifs nécessaires sont :

- Solution titrée de nitrate d'argent
- Solution standard de phénophtaléine
- Solution standard de chromate de potassium
- Eau distillée privée de CO₂ par ébullition
- H₂SO₄ N/50

Mode opératoire :

Pipeter 1 cm³ de filtrat et verser dans un bécher propre. Ajouter dans l'ordre : 30 à 40 cm³ D'eau distillée, quelques gouttes de H₂SO₄ en plus de la quantité nécessaire pour doser par ailleurs le Pf, une pincée de carbonate de calcium. (Ces deux dernières opérations ont pour but d'amener le filtrat à p H #7).

Ajouter quelques gouttes de chromate de potassium. Faire couler goutte à goutte à la burette le nitrate d'argent jusqu'à virage du jaune au rouge orangé.

$$\text{g/l de Cl}^{-} = 35,5 \times V \times T$$

Ou :

35,5 : masse équivalente du Cl⁻

V : volume de nitrate d'argent en centimètres cubes

T : titre de la solution.

. Pour obtenir le résultat en grammes par litre de Na Cl dans le filtrat.

2.3- Dosage quantitatif des chlorures totaux dans la boue

Une solution saturée en sel à température ambiante contient environ 318g/l de Na Cl ,mais une boue salée saturée peut transporter de fines particules de sel non dissous et qui constituent ce que l'on appelle en terminologie boue le " sel en excès " ou " sel en réserve " .

Il est donc important de connaître la quantité de sel totale que contient la boue, pour savoir si l'on dispose d'une réserve de sel en cas d'ajout accidentel d'eau douce.

Ces réactifs nécessaires sont les mêmes que pour le dosage des chlorures dans le filtrat.

Mode opératoire :

Prendre 200 cm³ de boue dont on connaît parfaitement le pourcentage d'eau en volume (effectue par distillation ; voir détermination de la teneur en solides).Ajouter deux fois ce pourcentage d'eau et agiter pendant une dizaine de minutes.

2.4- Dosage quantitatif du calcium dans le filtrat

Le Ca est apporté par le gypse (Ca SO_4), le chlorure de calcium (Ca Cl_2), la chaux (Ca (OH)_2), etc.

Une augmentation de la teneur en Ca amène parallèlement une augmentation du filtrat, d'où l'intérêt de ce dosage.

Ces réactifs nécessaires sont :

- Solution titrée de versénate N/50.
- Solution tampon de soude caustique à 200 g/l.
- Noir bleu au chrome, pulvérulent standard ; (formule : noir bleu au chrome : 1 g, Na Cl pur et sec : 100 g)
- Eau distillée.

Mode opératoire :

Pipeter 1 cm^3 de filtrat et verser dans un bécher propre. Ajouter 30 à 40 cm^3 d'eau distillée et une pincée de noir bleu au chrome standard. Ajouter goutte à goutte avec une pipette la solution tampon jusqu'à virage au rouge (éviter d'en mettre en excès pour ne pas rendre le dosage imprécis). Faire couler goutte à goutte à la burette le versénate N/50 jusqu'à virage du rouge au bleu.

$$\text{g/l de Ca}^{++} = 20 \times 0,02 \times V$$

Ou :

20 : masse équivalente de Ca^{++}

0,02 : titre du versénate N/50

V : volume de versénate utilisé en centimètres cubes

2.5- Dosage quantitatif du magnésium dans le filtrat

On dose Ca + Mg et on obtient Mg par différence.

Le magnésium est plus nocif que le calcium d'où le grand intérêt de ce dosage.

Réactifs nécessaires :

- Solution titrée de versénate N/50
- Solution tampon d'ammoniaque pure (densité = 0,910)
- Comprimés Merck pour dosage du magnésium
- Eau distillée.

Mode opératoire :

Pipeter 1 cm^3 de filtrat et verser dans un bécher propre. Ajouter 30 à 40 cm^3 d'eau distillée. Dissoudre un comprimé Merck. Ajouter 2 cm^3 de solution tampon. Faire couler goutte à goutte à la burette le versénate jusqu'à virage au vert.

$$\text{g/l de Mg}^{++} = (12,15 \times 0,02 \times V) - (\text{g/l de Ca}^{++} \times \frac{12,15}{20})$$

Ou :

12,15 : masse équivalente de Mg^{++} .

0,02 : titre de versénate N/50.

V : volume de versénate utilisé en centimètres cubes.

g/l de Ca^{++} : déterminé par ailleurs

Ou plus simplement : $\text{g/l de Mg}^{++} = 0,2432(N - n)$

Avec :

N : volume de versénate utilisé pour le dosage du Ca.

n : volume de versénate utilisé pour le dosage du Mg.

2.6- Dosage quantitatif des sulfates dans le filtrat

Une boue à l'eau qui contient plus de 15 g/l de SO_4^{--} soluble dans le filtrat possède des gels que l'on peut difficilement réduire et le seul traitement consiste à diluer le fluide à l'aide de boue neuve pour faire chuter la concentration en SO_4^{--} . Il est donc important de connaître la concentration en sulfates du filtrat.

Principe :

- Précipiter les sulfates par un excès de liqueur titrée de Ba Cl_2 N/50.
- Titrer l'excès de Ba Cl_2 par une solution de versénate N/50.
- Tenir compte du volume de versénate N/50 absorbé par le dosage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ éventuellement contenus dans la prise d'essai.

Mode opératoire :

a- Contrôle de la correspondance des liqueurs de Ba Cl_2 et de versénate

Prélever 10 cm^3 de solution de Ba Cl_2 N/50 et diluer à 50 cm^3 environ avec de l'eau distillée. Dissoudre un comprimé tampon Merck dans la solution. Ajouter 2 cm^3 d'ammoniaque pure à 20%. Ajouter 1 cm^3 de liqueur de Mg Cl_2 a N/50 (le baryum ne donnant pas de virage avec l'ériochrome noir). Le Ba Cl_2 a été ajouté afin de déterminer le terme du virage avec ce versénate. Doser par le versénate N/50, soit :

V le nombre de centimètres cubes de versénate N/50 utilisé

b- Estimation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$

Sur une autre prise d'essai de 1 cm^3 , déterminer la quantité de versénate N/50 nécessaire à l'estimation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$, soit :

V_1 la quantité de versénate utilisée

c- Estimation de l'alcalinité totale

Sur une nouvelle prise d'essai de 1 cm^3 , ajouter 50 cm^3 d'eau distillée, 1 goutte ou 2 de méthylorange. Titrer par HCl N/50 (cette neutralisation est nécessaire afin d'éviter l'utilisation de Ba Cl_2 pour la précipitation des carbonates éventuellement contenus dans le filtrat)

d- Précipitation des sulfates

Sur une nouvelle prise d'essai de 1 cm^3 , ajouter une quantité de H Cl N/50 égale à celle déterminée en c. Ajouter 10 cm^3 de Ba Cl_2 N/50. Chauffer à ébullition douce si possible en recouvrant le récipient, sinon laisser la solution au repos 1/2 heure à température ambiante.

e- Titration en retour

A la solution froide ainsi obtenue, Ajouter environ 50 cm^3 d'eau distillée. Dissoudre un comprimé Merck. Ajouter 2 cm^3 d'ammoniaque pure à 20% ainsi que 1 de N/50. Doser au versénate Mg Cl_2 N/50, soit :

V_2 la quantité de versénate utilisée

$$\text{SO}_4^{--} = 0,96[(V_1 + V) - V_2]$$

Ou en :

$$\text{Ca SO}_4 = 1,36[(V_1 + V) - V_2]$$

2.7- Dosage quantitatif du sulfate de calcium total dans la boue

Une boue douce est saturée en Ca SO_4 lorsque son filtrat en contient 2,2g/l. Dans les boues au gypse, on ajoute toujours à la boue une quantité plus importante de gypse afin d'avoir une réserve d'ions calcium permettant de conserver la saturation au fur et à mesure de

l'absorption des ions calcium par les argiles et marnes forées. Il est donc nécessaire de connaître la quantité de Ca SO₄ total contenu dans la boue.

Ces réactifs nécessaires sont Les mêmes que pour le dosage du calcium.

Mode opératoire :

Prendre 10 cm³ de boue .Ajouter 190 cm³ d'eau distillée .Agiter ½ heurs .Faire un filtrat en rejetant les premières fractions troubles et prélever 20 cm³ de ce filtrat .Doser le calcium par la méthode exposée en "dosage" g/l de Ca SO₄ total = 1,36 x volume de versénate utilisé

2.8- Dosage quantitatif de la chaux éteinte dans la boue

Pour connaître la quantité totale de chaux éteinte dans une boue, on effectue une mesure d'alcalinité sur 1 cm³ de boue. Cette mesure s'appelle Pb de la boue.

Réactifs nécessaires : Les mêmes que pour doser le Pf.

Mode opératoire :

Prendre 1 cm³ de boue .Ajouter dans l'ordre : 20 à 30 cm³ d'eau distillée privée de CO₂ par ébullition et agiter pour disperser la boue, 2 ou 3 gouttes de phénophtaléine, et rapidement à la burette l'acide N/50 jusqu'au retour du violet à la couleur initiale de la boue.

Pb est représenté par le volume d'acide N/50 employé.

$$\text{g/l de Ca(OH)}_2 = 0,74(\text{Pb} - \text{FI} \times \text{Pf})$$

Ou :

0,74 : masse moléculaire de Ca (OH)₂ x 0,01

Pb : alcalinité boue

Pf : alcalinité filtrat

Fi : traction liquide eau (exemple : 80% d'eau en volume =0,80 de fraction liquide).

2.9- Dosage quantitatif du pentachlorophénate de sodium dans le filtrat

(Par dosage du formol)

Les bactéries sont présentes dans la plupart des boues douces à pH<12. Si l'on ajoute de l'amidon ou un produit fermentescible dans ces fluides, il se produit une fermentation. Il faut maintenir dans le filtrat 1 à 2 g/l de pentachlorophénate de soude.

Réactifs nécessaires :

- Solution standard de phénophtaléine
- Solution de H₂ SO₄ N/50
- Solution de sulfate de soude fabriquée en dissolvant 4g de sulfite de soude dans 100 cm³ d'eau distillée
- Solution de H₂ SO₄ N/10
- Eau distillée

Mode opératoire :

Pipeter 3 cm³ de filtrat et verser dans un bécher propre. Ajouter 2 à 3 gouttes de phénophtaléine. Décolorer la phénophtaléine, s'il y a lieu, avec H₂ SO₄ N/50.

Au filtrat neutralisé ajouter 1 cm³ de sulfite de soude ; il se produit une coloration rouge.

Après 30 secondes de repos, ajouter ne goutte à goutte à la burette H₂ SO₄ N/10 jusqu'à obtenir une coloration légèrement rouge, soit V cm³ nécessaires.

Faire un second dosage en employant 3 cm³ d'eau distillée, soit y cm³ nécessaires.

$$\text{g/l de formol} = V - y$$

- Remarques

Le sulfite de soude en solution se détériore en 30 jours. Il faudra donc renouveler la solution tous les mois.

Le second dosage est fait d'habitude comme inhibiteur de fermentation des polyoxyméthylènes (para formaldéhyde et trioxyméthylène) qui sont des trimères de l'aldéhyde formique et aboutissent à ce dernier corps par dégradation.

On emploiera exactement la même technique de dosage et le résultat sera exprimé de la même façon que pour le formol.

2.10- Mesure du pH

Le pH d'une boue indique son acidité ou son alcalinité. L'échelle des pH varie de zéro à 14 unités, le chiffre 7 représentant la neutralité. L'eau distillée possède un pH de 7. Une solution normale d'un "acide fort"(tel que l'acide sulfurique) possède un pH de zéro. Une solution normale d'une "base fort"(telle que la soude caustique) possède un pH de 14 .L'échelle du pH est logarithmique et un pH de 9 est 10 fois plus basique qu'un pH de 8.

Il y a deux moyens de mesurer le pH d'une boue :

- A l'aide de papiers indicateurs qui changent de couleur en fonction du pH et que l'on compare à une échelle de couleurs, graduée en unités pH.
- A l'aide d'un pH mètre électronique dont le principe repose sur le fait que lorsque deux électrodes appropriées sont immergées dans un liquide , le voltage développé entre elles variera en fonction du pH du liquide .

Il est important de connaître le pH d'une boue pour les raisons suivantes :

- Certains traitements chimiques ne peuvent être efficaces que dans une gamme donnée de pH (cas du carbonate de baryum qui ne pourra lutter efficacement contre la contamination par le gypse ou l'anhydrite que dans des valeurs de pH comprises entre 9,2 et 9,5).
- L'amidon fermente en boue douce ne contenant pas d'anti-ferments si le pH est inférieur à 12.
- L'amidon s'hydrolyse en boue salée saturée si le pH est inférieur à 7.
- La dispersion des argiles est une fonction croissante de l'augmentation du pH mais l'efficacité des fluidifiants organiques est accrue lorsque l'on augmente le pH. Dans ce cas, il faut trouver un compromis situé généralement vers pH 10.

La tendance actuelle consiste à travailler avec des pH compris entre 7 et 10.

3- RECHERCHE QUALITATIVE DES IONS

Nous avons vu précédemment comment effectuer les principaux dosages quantitatifs sur le filtrat et sur la boue. Nous allons voir maintenant comment rechercher qualitativement s'il y a présence ou non d'un corps dans le filtrat ou dans la boue.

3.1 OH⁻

Pipeter 1 à 2 cm³ de filtrat et verser dans un tube à essai propre. Ajouter une giclée d'eau distillée privée de CO₂ par ébullition. Ajouter 2 à 3 gouttes de phénophtaléine.

- a- Si aucune coloration n'apparaît, le filtrat ne contient pas d'ions OH⁻.
- b- Si une coloration rose se manifeste, on ajoute 1 cm³ environ de Ba Cl₂ en solution à 10 % et on chauffe à ébullition.
- c- Si le filtrat se décolore, il n'y pas d'ions OH⁻.

d- Si le filtrat reste coloré, il y a présence d'ions OH^- .

3.2 Cl^-

Pipeter 1 à 2 cm^3 de filtrat et verser dans un tube à essai propre. Ajouter une giclée d'eau distillée et acidifier avec NO_3H . Ajouter 1 à 2 cm^3 de Ag NO_3 N/1. Un louche ou un précipité blanchâtre révèle la présence de Cl^- .

3.3 Ca^{++}

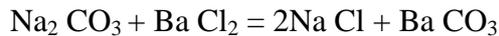
Pipeter 1 à 2 cm^3 de filtrat et verser dans un tube à essai propre. Ajouter dans l'ordre : une giclée d'eau distillée, quelques gouttes de H Cl N/1. 1 à 2 cm^3 de chlorure d'ammonium en solution à 10% (pour éviter la précipitation du Mg^{++}), 1 cm^3 environ d'ammoniaque pure et 1 à 2 cm^3 d'oxalate d'ammonium.

Un louche ou un précipité blanchâtre révèle la présence de Ca^{++} .

3.4 SO_4^{--}

Pipeter 1 à 2 cm^3 de filtrat et verser dans un tube à essai propre. Ajouter une giclée d'eau distillée, puis quelques gouttes de H Cl N/1. Ajouter 1 à 2 cm^3 de Ba Cl_2 en solution à 10%. Un louche ou un précipité blanchâtre révèle la présence de SO_4^{--} .

Nota : Il est nécessaire d'acidifier par HCl pour éviter la réaction.



Le Ba CO_3 qui précipite pourrait laisser croire qu'il s'agit de sulfate de baryum et fausserait l'estimation.

3.5 K^+

Pipeter 1 à 2 cm^3 de filtrat et verser dans un tube à essai propre. Ajouter 1 à 2 cm^3 d'acide picrique en solution à 10%. Un précipité jaune cristallin révèle la présence de K^+ (le précipité est parfois long à apparaître et aura l'aspect d'aiguilles jaunâtres).

3.6 H_2S

Poser sur la boue une bandelette de papier à l'acétate de plomb : le papier noircira en présence d' H_2S .

Chapitre II :

**RHEOLOGIE DES
FLUIDES : PARTIE
THEORIQUE**

INTRODUCTION

La rhéologie (rheo=couler et logos=étude) est la science de l'écoulement et de la déformation d'un fluide sous l'effet de contraintes qui lui sont appliquées. La dualité entre l'effort et la déformation est une propriété du matériau. Cependant, ce sont les mêmes lois de comportement et les mêmes grandeurs qui régissent les écoulements.

I- Mouvement laminaire de cisaillement.

I.1 Définition.

Un matériau soumis à un ensemble de forces est susceptible de se déformer. Les mouvements des différents points du matériau sont dépendants de la répartition et de l'intensité des forces appliquées (d'après Midoux, 1988).

Supposons, le mouvement d'un échantillon à une certaine vitesse (V) entre deux surfaces planes distance de (e), l'une immobile, l'autre animée d'un déplacement parallèle à la première (Figure II.1). Le 'cisaillement' du milieu sera quantitativement caractérisé par deux grandeurs rhéologiques : la vitesse et la contrainte de cisaillement notées respectivement γ . et τ .

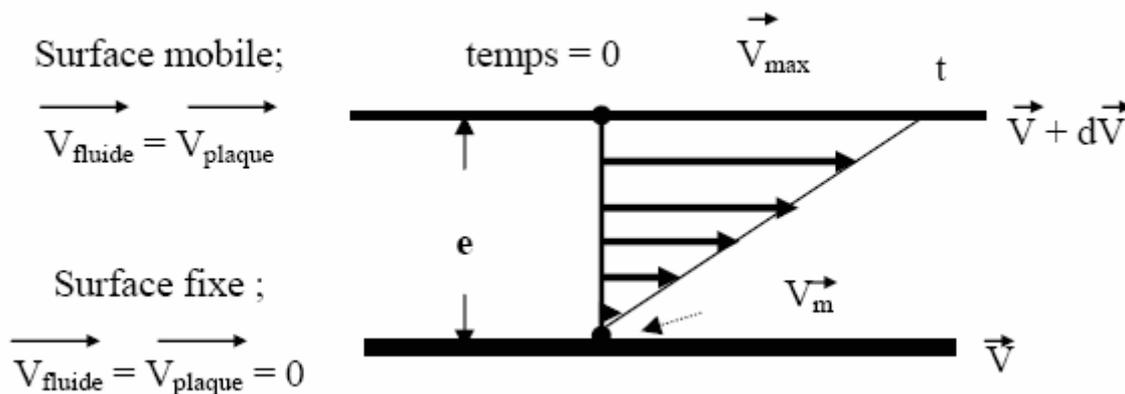


Figure II. 1: Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles

Les hypothèses du système, pendant toute la durée de l'écoulement (du cisaillement) sont :

- Un mouvement laminaire, c'est-à-dire sans turbulence (nombre de Reynolds inférieur à 2100). La structure du matériau est assimilée à une superposition de couches adjacentes (en lamelles) d'épaisseur infiniment mince. La déformation du matériau s'effectue par un glissement relatif des différentes couches les unes sur les autres, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre. Il s'agit d'un mouvement strictement ordonné qui se produit sans brassage de matériau et sans variation de son volume.
- Un écoulement stationnaire dont la vitesse est stable pour tous les points du système considéré.
- Dans de nombreux cas, les γ . et τ sont identiques dans une même couche mais varient d'une couche à l'autre.

I.2 Contrainte de cisaillement.

La contrainte de cisaillement (notée τ) est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentielllement à la surface de la couche, elles sont appelées force de cisaillement (figure II.2).

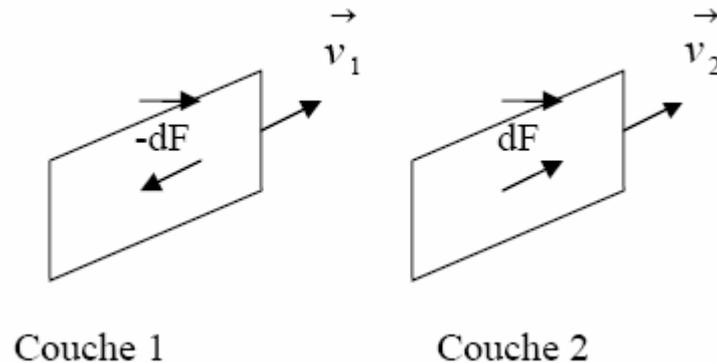


Figure II.2 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.

En supposant que la couche 1 est animée d'une vitesse V_1 supérieure à la vitesse V_2 de la couche 2, la couche 1 exerce sur la couche 2 une force de cisaillement dF parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche 2. La couche 2 exerce pour sa part sur la couche 1, une force de cisaillement $-dF$ tendant à la freiner. En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface, on définit la contrainte de cisaillement τ (équation (II.1)) :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad \text{Equation II.1}$$

τ représente une force par unité de surface, elle s'exprime en newton par m^2 ou bien plus commodément en Pascal (Pa) et dS est la surface élémentaire de l'entité considérée.

Il est à noter que dans le calcul de la résultante des forces, les forces de pression s'exerçant perpendiculairement à la surface ne sont pas prises en compte, du fait de leur faible valeur en comparaison aux forces de cisaillement.

I.3 Déformation et vitesse de cisaillement.

La vitesse maximale de l'écoulement est située à la limite supérieure et décroît à travers l'entrefer d'épaisseur 'e' jusqu'à la vitesse minimale $V_{min} = 0$ (m s⁻¹) limite inférieure correspondant au contact avec la plaque fixe (Figure II.1).

La vitesse de cisaillement, notée γ , caractérise la variation de la vitesse (dV) entre l'épaisseur des couches limites (de) et s'exprime sous la forme suivante (Equation II.2) :

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{de} \quad (\text{s}^{-1}) \quad \text{Equation II.2}$$

La valeur de $\dot{\gamma}$ dépend, non seulement de la vitesse de déplacement de la plaque mobile dv mais aussi, de l'épaisseur e cisailée. Si e est faible, il est possible d'obtenir des $\dot{\gamma}$ élevés même avec des vitesses V relativement faibles (Coussot et Grossiord, 2001).

Viscosité :

La détermination de ces deux grandeurs ($\tau, \dot{\gamma}$) permet de définir la viscosité du fluide étudié. La contrainte de cisaillement augmente avec la vitesse de cisaillement. Mais le rapport entre ces deux grandeurs va dépendre des propriétés du milieu considéré, c'est la viscosité notée μ . L'expression de μ est donnée par l'équation II.3 et caractérise la résistance à la déformation du fluide sur les forces appliquées (Coussot et Grossiord, 2001).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Pa.s}) \quad \text{Equation II.3}$$

La viscosité est une grandeur suffisante pour caractériser de manière précise le comportement rhéologique d'un fluide, si celui-ci se trouve être un fluide newtonien pour lequel la viscosité est indépendante du cisaillement. Autrement, dans le cas d'un fluide non newtonien, la viscosité varie en fonction du cisaillement et montre ainsi un comportement rhéologique beaucoup plus complexe. Dès lors, on parlera de viscosité apparente définie par la même équation II.3.

De plus, la détermination de la contrainte et de la vitesse de cisaillement permet de définir l'équation d'état du milieu étudié, c'est-à-dire la relation $\tau = f(\dot{\gamma})$. Les courbes traduisant graphiquement cette équation rhéologique d'état du matériau sont appelées les rhéogrammes.

Tableau II.1 : les valeurs de viscosité de différents milieux à température ambiante.

Matériau	Viscosité (Pa.s)
Air	10^{-5}
Eau	10^{-3}
Huile d'olive	10^{-1}
Glycérine	1
Miel	10
Polymères fondus	10^3
Bitume	10^8

II- Mode de mesure et typologie de l'écoulement.

1- Rappels :

Les rhéomètres permettent d'obtenir directement les rhéogrammes qui servent à décrire les propriétés d'écoulement du matériau. La représentation la plus courante consiste à exprimer la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement. Ainsi, les typologies des rhéogrammes représentatifs des fluides newtoniens et des fluides non newtoniens (Coussot et Grossiord, 2001).

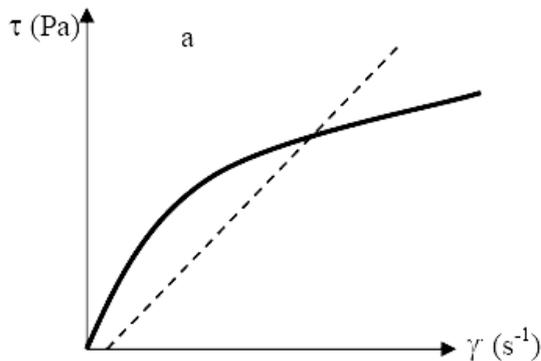


Figure II.3 :Rhéogrammes des fluides newtoniens (- - -) et non newtoniens(-----)

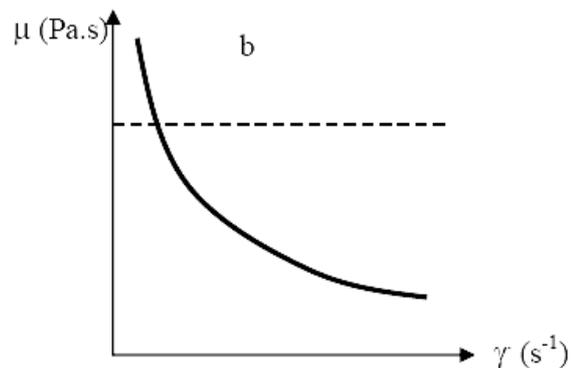


Figure II.4 : Viscosites des fluides newtoniens (- - -) et non newtoniens(-----)

Les fluides newtoniens ont leur viscosité constante en fonction de la vitesse de cisaillement traduisant un comportement indépendant du cisaillement appliqué (Figure II.3).

Cependant de nombreux autres fluides ne présentent pas ce comportement simple lors de l'écoulement, leurs viscosités dites 'apparentes' dépendent du gradient de vitesse (Figure II. 4). Ces fluides sont dits 'non newtoniens'. Ce comportement non newtonien se traduit, sous l'effet de la vitesse de cisaillement, par une orientation progressive des particules dans le sens des couches d'écoulement. La diminution des interactions de frottement entre particules, favorise leur glissement relatif. Une seconde interprétation consiste à envisager une modification de la structure du matériau sous l'effet du gradient de vitesse (déstructuration par rupture de liaison de type Van der Waals, défloculation des particules...).

Dans la plupart des cas, les quatre typologies d'écoulement suivantes peuvent décrire les fluides aux comportements non newtoniens (Coussot et Grossiord, 2001) :

- Comportement sans contrainte critique,
- Comportement avec contrainte critique,
- Comportement thixotrope,
- Comportement viscoélastique.

Les suspensions de boues activées, digérées ou pâteuses, ont été rapportées dans la littérature comme étant des fluides non newtoniens (Forster, 1982 ; Dentel, 1997 ; Seyssiecq et al., 2003 ; Tixier et al., 2003, 2003a, b ; Baudez et al., 2004) et font appel à l'utilisation de modèles rhéologiques complexes pour décrire leur comportement en écoulement. Cependant, la plupart de ces suspensions de boues peuvent présenter, sur une partie des rhéogrammes

expérimentaux, un comportement pseudo-newtonien, généralement exploité par les auteurs (Seyssiecq et al, 2003, Tixier et al, 2003a, b) par le modèle de Bingham.

La partie qui suit va s'attacher à regrouper pour chacun de ces quatre comportements rhéologiques rencontrés pour la caractérisation rhéologique des boues :

- une définition générale du comportement pour les fluides non newtoniens avec la représentation des courbes d'écoulement (rhéogrammes) les caractérisant.
- une présentation des modèles rhéologiques habituellement utilisés dans la littérature pour décrire la typologie d'écoulement de tels fluides non newtoniens.
- une synthèse des travaux de la littérature scientifique concernant la caractérisation rhéologique des boues.

2- Typologie de l'écoulement

L'écoulement des fluides newtoniens est le cas le plus simple que l'on puisse trouver ; dans ce cas, vitesse de cisaillement et contrainte de cisaillement sont reliées par une loi linéaire. La pente de la droite alors obtenue en traçant le rhéogramme est la viscosité du fluide.

Tous les fluides homogènes pour lesquels la dissipation d'énergie est due aux collisions d'espèces moléculaires relativement petites ont un comportement newtonien (gaz, liquides usuels et solutions de molécules de faible poids moléculaire).

La majorité des fluides présentent toutefois des comportements non newtoniens qui font appel à l'utilisation de modèles rhéologiques plus complexes pour décrire leur comportement en écoulement.

2.1- Fluides sans contrainte critique

2.1.1- Définition :

Les fluides sans contrainte critique regroupent deux principales catégories de fluides : les fluides rhéofluidifiants et fluides rhéoépaississants.

Les courbes d'écoulements (ou rhéogrammes) de ces deux principales catégories de fluides sans contrainte critique sont représentées dans la Figure II.5 (Coussot et Grossiord, 2001).

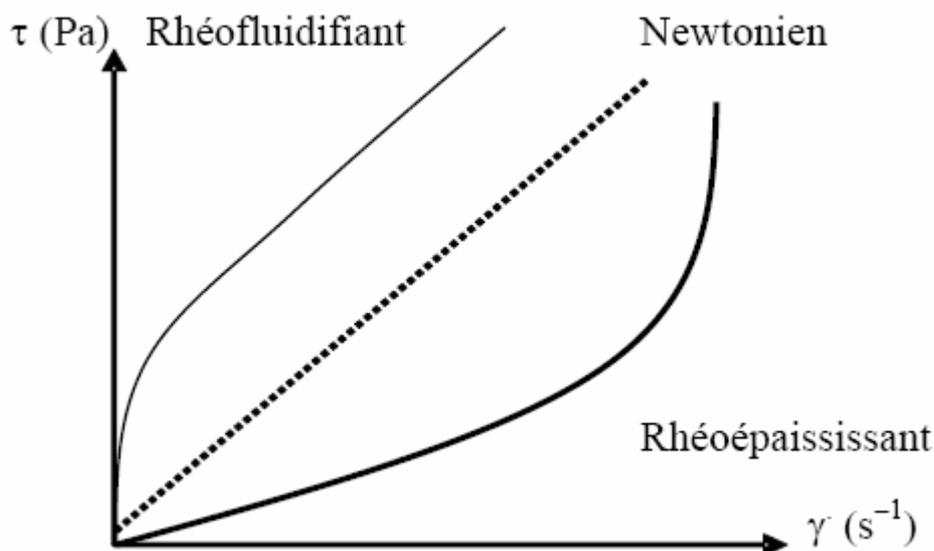


Figure II.5 : Rhéogrammes des principales catégories de fluides sans contrainte critique

La première catégorie concerne les fluides rhéofluidifiants (ou pseudoplastiques). La représentation de cette catégorie de fluide est caractérisée par un rhéogramme $\tau = f(\dot{\gamma})$ passant par l'origine avec une concavité vers le bas (Figure II.5).

Pour les fluides rhéofluidifiants, le rapport $\tau/\dot{\gamma} = \mu_{app}$ (viscosité apparente) décroît progressivement lorsque le gradient de vitesse augmente jusqu'à atteindre une valeur de viscosité limite (μ_{lim}). A l'échelle microscopique, ces matériaux présentent au repos une structure organisée qui provoque une résistance à l'écoulement. L'accélération du cisaillement force les constituants à s'orienter parallèlement entre eux, dans le sens de l'écoulement.

Les interactions de frottement sont ainsi diminuées et l'ensemble oppose moins de résistance à l'écoulement. La viscosité est moins importante et le liquide devient plus fluide. Ce type de comportement est le plus fréquent.

La deuxième catégorie, beaucoup moins fréquente, concerne les fluides rhéoépaississants (ou dilatants), représentée par le rhéogramme $\tau = f(\dot{\gamma})$ passant par l'origine avec une concavité vers le haut (Figure II.5). Cette catégorie de fluide voit sa μ_{app} croître avec l'augmentation de la $\dot{\gamma}$. Le volume des fluides augmente sous la contrainte mécanique. Ce type de fluide peut avoir pour cause une origine moléculaire. On peut évoquer l'augmentation du volume libre entre les particules constitutives du fluide. Au repos, ce volume libre serait minimal alors que sous un gradient de vitesse en augmentation, il y aurait gonflement du liquide (les particules sont moins imbriquées). La phase continue n'est plus capable de combler les vides interparticulaires ni d'assurer une bonne lubrification. Ainsi, sous des $\dot{\gamma}$ élevés, les particules sont aléatoirement dispersées, un désordre s'installe au sein du fluide et la viscosité augmente.

2.1.2- Modélisation Mathématique

Les principales lois rhéologiques décrivant les fluides sans contrainte critique sont présentées dans le Tableau II.2.

Tableau II.2 : Lois rhéologiques de fluides ne présentant pas de contrainte critique (d'après Midoux, 1988).

Modèle	Loi rhéologique
Ostwald de Waele	$\tau = k.\dot{\gamma}^n$
Ellis	$\tau = [\mu_0 / (1 + (\tau/\tau_{1/2})^{\alpha-1})].\dot{\gamma}$
Sisko	$\tau = \mu_0.\dot{\gamma} + k.\dot{\gamma}^n$
Reiner Phillipoff	$\tau = [\mu_\infty + ((\mu_0 - \mu_\infty) / (1 + (\tau/\tau_s)^2)].\dot{\gamma}$
Prandtl-Eyring	$\tau = \tau_0 \text{sh}^{-1}(\tau_0.\dot{\gamma})$
Carreau	$\tau = [\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty).(1 + (\lambda\dot{\gamma})^2)^{(n-1)/2}].\dot{\gamma}$
Cross	$\tau = [\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) / (1 + \dot{\gamma}t_1)^p].\dot{\gamma}$

Parmi ces modèles d'écoulement, la loi Ostwald de Waele ou loi puissance est la plus communément utilisée. Dans ce modèle à deux paramètres, k est appelée la consistance du fluide et n (< 1) l'indice de comportement traduisant l'écart avec le fluide de Newton. D'autres fluides présentent un comportement pseudoplastique et utilise ce modèle tels que les ciments, les colles... Les limites de ce type de loi interviennent quand le matériau présente des régions de comportement newtonien à faible ou forte vitesse de cisaillement.

Les fluides rhéoépaississants obéissent également à la loi puissance d'Ostwald mais avec $n > 1$.

2.2- Fluides à contrainte critique

2.2.1- Définition :

Les fluides avec contrainte critique concernent les fluides dits plastiques (Coussot et Grossiord, 2001). Le comportement plastique de ces fluides se traduit par l'existence d'une contrainte de cisaillement seuil τ_c en dessous de laquelle l'écoulement n'est pas favorisé (Figure II.6).

Ces fluides sont généralement liés à l'existence d'une structure tridimensionnelle assez rigide (particules emboîtées) ou floculées, qui ne se rompt que si on exerce une force minimale. Le seuil d'écoulement correspond à l'énergie nécessaire pour séparer les particules. Au-delà, l'écoulement s'effectue sous l'effet de la contrainte effective ($\tau - \tau_c$).

On distingue deux types de liquides plastiques: un liquide plastique idéal ou fluide de Bingham et un liquide non idéal ou fluide de Casson avec un comportement plastique fluidifiant. Ce cas est plus répandu que les liquides de Bingham.

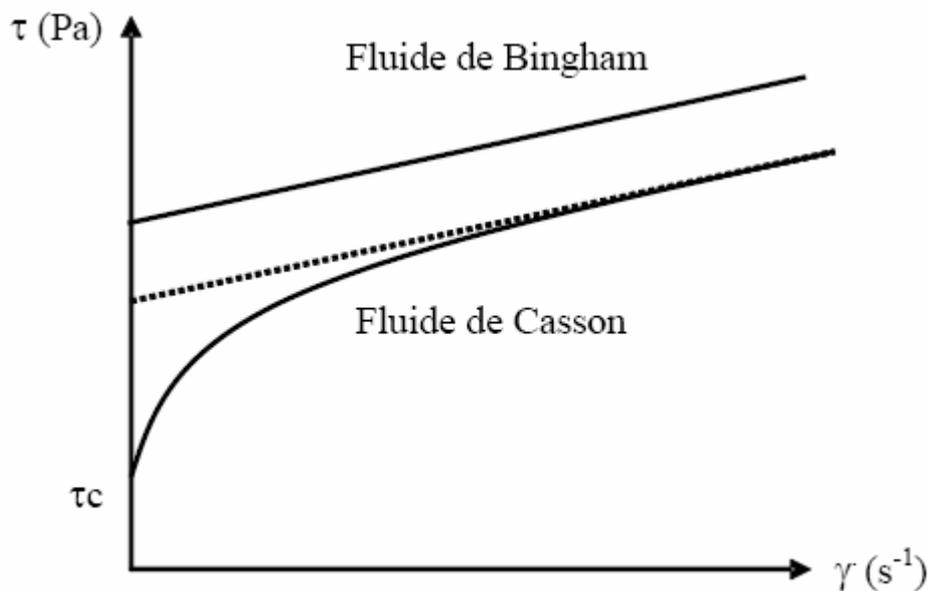


Figure II.6 : courbe d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique

2.2.2- Modélisation Mathématique

Le Tableau II.3 récapitule les principales lois d'écoulement rhéologiques utilisées pour décrire le comportement de tels fluides.

Le modèle Herschel-Bulkley est celui permettant de décrire la plupart des fluides plastiques. La courbe d'écoulement de tels fluides finit par devenir rectiligne au-delà d'une contrainte critique appliquée. Le modèle de Bingham est le plus simple de ces modèles ou μ_B désigne la viscosité plastique. Le fluide de Bingham s'écoule lorsqu'un seuil minimal de contrainte τ_B est dépassé.

Tableau II.3 : Modèles rhéologiques décrivant l'écoulement de fluides à contrainte critique (d'après Midoux, 1988)

Modèle	Loi rhéologique
Bingham	$\tau = \tau_B + \mu_B \cdot \gamma$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_H + K \cdot \gamma^n$
Casson général	$\tau^n = \tau_c^n + (k_c \cdot \gamma)^n$
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + (k_c \cdot \gamma)^{1/2}$

Parmi les fluides présentant un comportement plastique, le modèle de Bingham a été utilisé pour étudier les peintures à l'huile alors que le modèle de Casson a étudié la pâte dentifrice ou la pâte à pain.

2.3- Fluides thixotropies

2.3.1- Définition :

La thixotropie témoigne de l'importance de l'histoire mécanique antérieure du matériau dans la détermination de son comportement rhéologique (Coussot et Grossiord, 2001). La thixotropie est généralement due à une rupture réversible de la structure particulière du fluide sous l'effet d'un cisaillement. Tout se passe comme si les contraintes subies dans un passé relativement récent, modifiaient le comportement du fluide à l'écoulement présent. Ce comportement se traduit par des rhéogrammes présentant un cycle ou surface d'hystérèse (Figure II.7).

L'obtention de ces rhéogrammes $\tau = f(\dot{\gamma})$ consiste en une montée puis une diminution régulière d'un cisaillement imposé ($\dot{\gamma}$, où τ) afin de revenir à la valeur initiale ; on réalise ce qu'on appelle une " charge " (cisaillement croissant) puis une " décharge " (cisaillement décroissant).

Sous l'effet du cisaillement, la structure du fluide a été modifiée durablement lors de la charge et le comportement du produit est affecté (rhéogramme de décharge différent, liquide globalement moins visqueux). A la notion de thixotropie est associé un caractère de réversibilité de la déstructuration c'est-à-dire qu'après un temps de repos suffisant, le matériau

doit retrouver sa structure initiale. Le comportement thixotrope concerne les corps fluidifiants et les corps plastiques (plus rarement les épaississants). Le comportement va dépendre des mécanismes de réarrangement moléculaire mis en jeu. Certains vont faire intervenir les mouvements locaux ; ce sont des mouvements à petite échelle qui seront caractérisés par des temps 'courts'.

Ces mouvements mettent en jeu un comportement plutôt élastique. D'autres mécanismes vont faire intervenir des mouvements à grandes échelles qui sont caractérisés par des temps longs et qui correspondent à l'écoulement du matériau c'est-à-dire au comportement visqueux. Le domaine intermédiaire étant celui du comportement viscoélastique

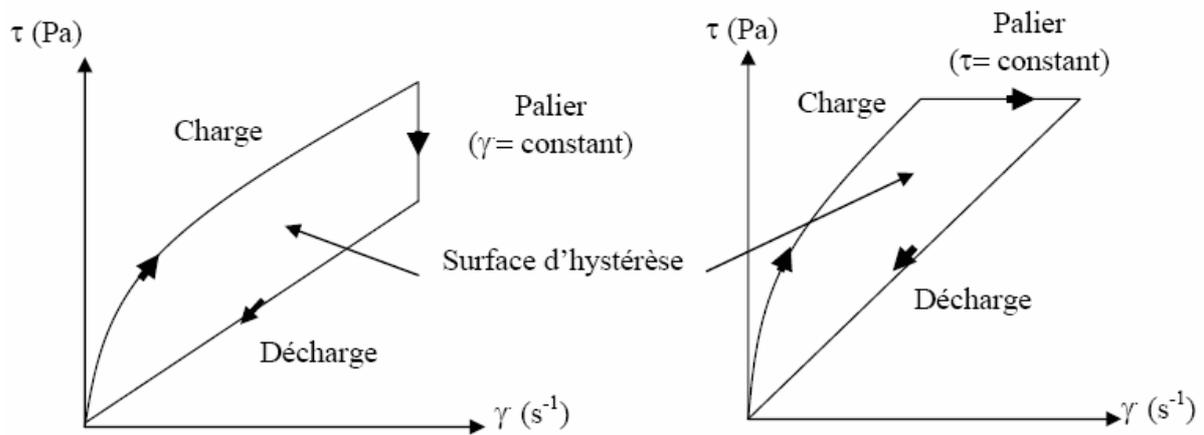


Figure II.7 : Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à vitesse de cisaillement imposée (a) ou à contrainte de cisaillement imposée (b)

2.3.2- Modélisation Mathématique

Certains auteurs ont tenté de quantifier les propriétés thixotropes à travers certains coefficients empiriques tels ceux présentés dans le Tableau II.4.

Pour l'expression du coefficient de déstructuration B, les indices 1 et 2 se rapportent respectivement aux viscosités plastiques μ_{p1} et μ_{p2} mesurées en rampe de décharge après deux durées de cisaillement t_1 et t_2 au gradient maximum $\dot{\gamma}_{max}$ de la rampe de charge. Concernant le coefficient M, les indices 1 et 2 distinguent deux valeurs différentes de gradients de vitesse maximum $\dot{\gamma}_1$ et $\dot{\gamma}_2$ pour des rampes de gradients de vitesse de mêmes accélérations. Les mesures de μ_{p1} et μ_{p2} sont déterminées à partir de la rampe de décharge immédiatement enchaînée après que les gradients de vitesse aient atteint les valeurs de consigne $\dot{\gamma}_1$ et $\dot{\gamma}_2$. Les viscosités maximales (μ_{max}) et minimales (μ_{min}) obtenues à partir des boucles d'hystérèse peuvent aussi fournir des critères de comparaisons.

La surface de la boucle d'hystérésis ($\tau = f(\dot{\gamma}_t)$) formée par les mesures successives à gradients de vitesses croissants puis décroissants constitue également une mesure relative pour quantifier le degré de thixotropie du fluide (Yen et al., 2002 ; Tixier et al., 2003b ; Guibaud et al., 2005).

Tableau II.4 : coefficients permettant de déterminer le caractère thixotrope de fluides de Bingham

$B = -t \cdot d\mu_p / dt = (\mu_{p1} - \mu_{p2}) / \log(t_1 - t_2)$	Coefficient de déstructuration thixotrope en fonction du temps
$M = (\mu_{p1} - \mu_{p2}) / \log(\gamma_2 / \gamma_1)$	Coefficient de déstructuration thixotrope en fonction de la vitesse de cisaillement
$\mu_{\max} - \mu_{\min}$	
$(\mu_{\max} - \mu_{\min}) / \mu_{\min}$	

3- Mesures en mode dynamique : détermination de la viscoélasticité.

Tous les liquides présentent des propriétés visqueuses, certains possédant une structure complexe peuvent également présenter des propriétés élastiques. Ce comportement se manifeste notamment lorsqu'on applique ou lorsqu'on supprime brutalement un cisaillement par l'apparition d'un régime transitoire pendant lequel la structure de l'échantillon évolue avant de se stabiliser. La détermination des propriétés viscoélastiques de certains matériaux passe par la mise en place d'une analyse oscillatoire. Ce type de test consiste à imposer à l'échantillon un cisaillement oscillatoire de pulsation donnée ω . Lors de ces tests, la contrainte $\tau(t)$ et la vitesse de cisaillement $\gamma(t)$ évoluent sinusoïdalement au cours du temps

3.1- Viscoélasticité linéaire

Un fluide viscoélastique récupère une partie de ses déformations après suppression des contraintes et la contrainte associée à une déformation, diminue dans le temps (équations II.4 et II.5).

Le comportement viscoélastique de fluides peut être décrit conceptuellement comme résultant de l'association de ressorts et d'amortisseurs. Toutes les associations de ressorts et d'amortisseurs, aussi complexes soient-elles, correspondent à un comportement viscoélastique linéaire. A partir des lois d'association en série et en parallèle, on peut établir l'équation rhéologique de chaque modèle et en déduire les fonctions fluage et relaxation dans chaque cas particulier. Il s'avère toutefois que les modèles de Kelvin-Voigt et de Maxwell généralisés suffisent pour déduire n'importe quelles fonctions de fluage et de relaxation. Le modèle de Maxwell correspond à l'association en parallèle de n liquides de Maxwell, chacun d'eux étant constitué par un ressort et un amortisseur en série.

Le modèle de Kelvin-Voigt généralisé est pour sa part constitué par l'association en série d'un liquide de Maxwell et de n solides de Kelvin-Voigt (constitué lui-même par l'association en parallèle d'un ressort et d'un amortisseur).

Relation générale du comportement viscoélastique :

$$\gamma(t) = \frac{\tau(t)}{\mu} + \frac{1}{G} \cdot \frac{d\tau(t)}{dt} \quad \text{Equation II.4}$$

Exemple du solide de Kelvin Voigt avec $\tau = \tau_0 = \text{cte}$ pour $t \gg 0$ et $\gamma = 0$ pour $t < 0$:

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{G} \cdot [1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}] \quad \text{Equation II.5}$$

Avec $\lambda = \mu / G$

Le facteur temps intervient dans l'expression des propriétés viscoélastiques à travers le temps de relaxation (λ). Le temps de relaxation correspond à la durée de valeur λ pendant laquelle la tension γ diminue de 1/e de sa valeur initiale.

Si $t \gg \lambda$ alors $\gamma(t) = \tau \cdot J_{\infty} + \tau \cdot t / \mu$ Equation II.6

Les fonctions de fluage $J(t)$ et de relaxation $G(t)$ caractérisent l'écoulement des fluides viscoélastiques selon les modes de mesures en cisaillement simple. La modélisation de ces fonctions conduit généralement à des formes développées du type $\gamma(t) = J(t) \cdot \tau + O(\tau_3)$.

Les propriétés viscoélastiques correspondantes ne sont donc pas aisées à déterminer et leur caractérisation ne fournit pas de paramètres clés rapidement identifiables. De plus, la méthode de sollicitation en cisaillement simple repose sur des échelons de contrainte (fluage) ou de déformation (relaxation) imposés de façon instantanée. En réalité, ce principe théorique est confronté à l'inertie mécanique du système de mesure des rhéomètres. C'est pourquoi on utilise les propriétés de réponse oscillatoire des fluides viscoélastiques soumis à des sollicitations de type sinusoïdales en fonction du temps.

3.2- Paramètres complexes

En mode dynamique, on applique des contraintes ou des déformations qui répondent à des fonctions sinusoïdales du temps (t) de pulsations données (ω) qui ne provoquent pas l'écoulement du fluide. A l'instant initial on a :

$$\gamma(\omega) = \gamma_0 \cdot \cos(\omega t) \quad \text{Equation II.7}$$

$$\tau(\omega) = \mu \cdot \omega \cdot \gamma_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \tau_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad \text{Equation II.8}$$

La contrainte mesurée (τ) est en déphasage permanent avec la déformation (γ) d'un angle φ compris entre 0 et $\pi/2$. En fonction du temps de mesure (t), ce décalage par rapport aux conditions initiales devient tel que :

$$\gamma(\omega t) = \gamma_0 \cdot e^{j\omega t} = \gamma_0 \cdot (\cos(\omega t) + j \cdot \sin(\omega t)) \quad \text{Equation II.9}$$

$$\text{Soit } \gamma(\omega t) = \gamma'(\omega) + j \cdot \gamma''(\omega) \quad \text{Equation II.10}$$

$$\text{De même } \tau(\omega t) = \tau'(\omega) + j \cdot \tau''(\omega) \quad \text{Equation II.11}$$

Par analogie avec le solide de Hooke, on définit un module de rigidité complexe $G^*(\omega)$:

$$G^*(\omega) = \frac{\tau(\omega t)}{\gamma(\omega t)} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cdot e^{j\phi} = G'(\omega) + j \cdot G''(\omega) \quad \text{Equation II.12}$$

La rigidité d'accumulation $G'(\omega)$ traduit la capacité du fluide à conserver l'énergie sous forme élastique (en phase avec γ). Les propriétés visqueuses sont exprimées par la rigidité de dissipation $G''(\omega)$ (déphasage de $\pi/2$ avec γ).

Par analogie avec la relation de Newton, on définit la viscosité complexe $\mu^*(j\omega)$:

$$\mu^*(j\omega) = \frac{\tau(\omega t)}{\dot{\gamma}(\omega t)} = \mu'(\omega) - j \cdot \mu''(\omega) \quad \text{Equation II.13}$$

$$\text{Avec } \mu' = \frac{G''}{\omega} \text{ et } \mu'' = \frac{G'}{\omega} \quad \text{Equation II.14}$$

Les viscosités complexes traduisent les rapports de déphasage de la contrainte avec la vitesse de déformation $\dot{\gamma}$. La viscosité pure μ' (caractère visqueux) est en phase avec $\dot{\gamma}$. alors que la viscosité élastique μ'' est déphasée de $\pi/2$.

L'analyse oscillatoire permet une identification très précise de la structure de l'échantillon étudié, elle peut aussi permettre la mise en évidence de transitions (température de fusion, transition vitreuse, gélification...).

Chapitre III :

**RHEOLOGIE DES BOUES
DE
FORAGE**

INTRODUCTION

Les mesures rhéologiques sont utilisées dans l'industrie afin de caractériser les nombreux types de suspension, notamment dans les secteurs de fluide de forage, de l'agroalimentaire, de la pharmacie, de la cosmétique, de la chimie des peintures ou des polymères. Une des principales applications de la rhéologie est la détermination de la viscosité des matériaux dans différentes conditions et sous l'influence de contraintes variables (cisaillement, température,...).

Nous présentons dans ce chapitre, la caractérisation rhéologique des boues de forage qui fait l'objet de recherches visant à une meilleure connaissance de ces matériaux. Une revue des travaux de la littérature scientifique concernant la caractérisation rhéologique des boues. La présentation des modes de mesure ainsi que les matériels utilisés sera effectuée, suivie d'un rappel des différents comportements des boues enregistrés ainsi que des facteurs considérés comme ayant une influence sur la rhéologie des boues. Un exposé des principales applications pratiques des mesures réalisées sur des boues achèvera ce chapitre.

1- Appareillages de préparations et de mesures employés :

1-a Appareillages de préparation :

- **La balance a boue**

La figure III.1 illustre deux types de balances à boue. La balance a boue est constituée par un fléau de longueur fixe, à une extrémité duquel est fixé un récipient de volume déterminé, fermé par un couvercle. Le reste du fléau constitue une régule graduée, le long de laquelle se déplace un cavalier. Le point fixe du fléau permet sa mise en équilibre sur le couteau du support. On mesure le poids spécifique de la boue en suivant ces étapes :

Remplir le récipient de boue, dont on mesure le poids spécifique.

1- Placer le couvercle sur son siège dans le récipient par un léger mouvement tournant.

S'assurer que la boue s'échappe par le trou percé dans le couvercle.

2- Mettre son doigt sur le trou du couvercle, enlever l'excès de boue sur la surface extérieure du récipient et du fléau en la lavant ou en l'essuyant

3- Placer le point fixe sur le couteau du support. Amener le fléau à l'horizontale en déplaçant le cavalier sur la règle.

4- Lire la graduation de la régule sur la face gauche du cavalier

5- Noter le poids spécifique ainsi lu.

6- Pour les balances non graduées avec les unités désirées.

Rincer immédiatement le récipient après chaque utilisation

Il est absolument nécessaire que tous les composants de la balance à boue soient parfaitement propres, si on désire obtenir des mesures précises.

L'étalonnage de la balance à boue se fait de la façon suivante :

1- Remplir le récipient d'eau douce propre.

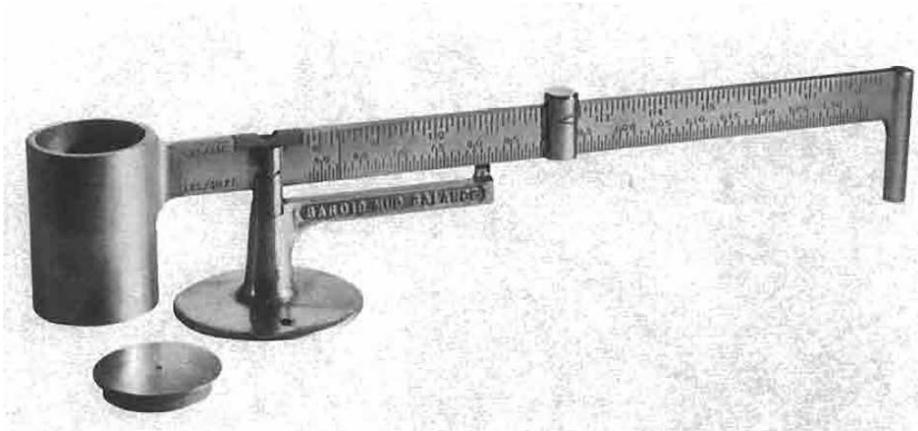
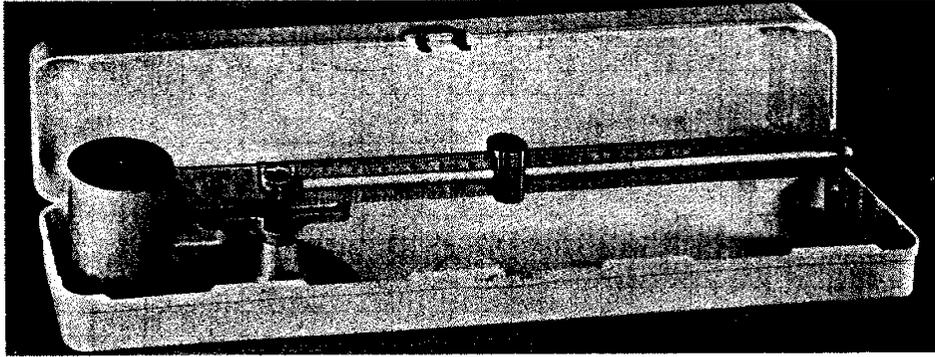
2- Placer le couvercle et essuyer.

3- Mettre le cavalier à la graduation 1 kgf/dm^3 et poser le fléau sur le couteau du support.

4- Si le fléau n'est pas horizontal, ajouter ou enlever de la grenaille, selon le cas, ou ajuster la vis de réglage en bout de fléau. La chambre à grenaille se trouve également en bout de fléau.

5- Si l'eau douce donne une valeur inférieure à 1 kgf/dm^3 , ajouter cette différence à la mesure faite sur la boue. De la même manière, si l'eau douce donne une valeur supérieure à 1 kgf/dm^3 , retrancher cette différence de la mesure faite sur la boue. Par exemple, si les mesures

faites sur de l'eau douce et de la boue sont respectivement de 0,98 et 1,25 kgf/dm³, ajouter 0,2 à la lecture faite sur la boue pour obtenir le poids spécifique exact de la boue, soit 1,27 kgf/dm³.



FigureIII.1. Différents types de balances a boue.

- **Mesures de la viscosité et du gel**

Sur le chantier, la mesure de routine de la viscosité se fait au moyen de l'entonnoir Marsh (fig.III.2), qui mesure le temps d'écoulement d'un volume de boue donné à travers un orifice donné. La valeur ainsi obtenue est appelée viscosité "apparente". Les viscosimètres à mesure directe (fig. III.3) mesurent également une viscosité apparente, mais caractérisent mieux les propriétés d'écoulement de la boue, étant donné qu'ils disposent de plusieurs vitesses de rotation. La viscosité apparente d'une boue est constituée de deux variables, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement. Ces valeurs, ainsi que les mesures de résistance de gel, faites à des intervalles de temps donnés, caractérisent les qualités thixotropiques de la boue, et sont déterminées au moyen d'un viscosimètre à mesure directe.

La viscosité plastique représente la résistance d'un fluide à l'écoulement, causée essentiellement par le frottement des particules en suspension et par la viscosité proprement dite de la phase liquide. En pratique, la viscosité plastique est fonction de la concentration en solides, de leurs dimensions et de leur forme.

Le seuil de cisaillement est un reflet des forces, entre les particules. Ces forces sont le résultat de charges électriques, positives ou négatives, localisées à la surface ou à proximité de la surface des particules. Le seuil de cisaillement est une mesure en condition dynamique des forces qui développent la résistance de gel en condition statique. Ces forces ont tendance à déplacer les particules de telle façon que les forces d'attraction et de répulsion tendent vers l'équilibre. Une mesure de résistance de gel est une indication de l'état de ces forces en condition de repos.



Figure III.2 : Entonnoir de marsh

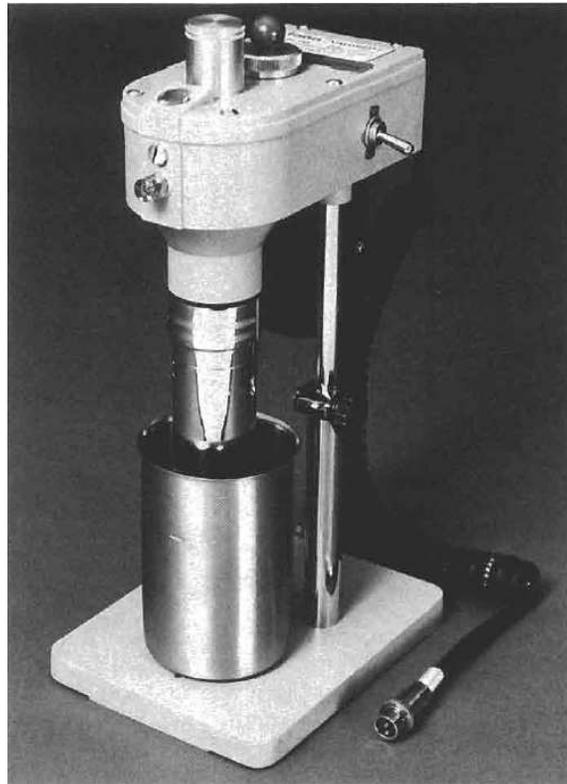


Figure . III.3. Rhéomètre FANN 32

Une variation de la viscosité plastique d'une boue de forage cause de faibles variations du seuil de cisaillement. Le seuil de cisaillement peut être modifié avec une faible variation ou même sans variation de la viscosité plastique. On peut s'attendre à ce qu'une addition d'eau diminue la viscosité plastique, tandis que l'addition d'un dispersant approprié diminue la valeur du seuil de cisaillement. La viscosité plastique et le seuil de cisaillement constituent les caractéristiques d'écoulement de la boue et reflètent le comportement colloïdal et tensioactif des solides présents dans la boue.

Une courbe d'écoulement de boue typique, déterminée au viscosimètre à mesure directe est illustrée par la figure III-4. La pente de la ligne droite est proportionnelle à la viscosité plastique, et l'ordonnée de son point d'intersection avec l'axe est proportionnelle au seuil de cisaillement

- **Entonnoir Marsh**

L'entonnoir Marsh a un diamètre de 152,4 mm (6") à sa partie supérieure et une hauteur de 304,8 mm (12"). Son extrémité conique aboutit à un tube de 50,8 mm (2") de long, ayant un diamètre intérieur de 4,76 mm (3/16"). La capacité de l'entonnoir jusqu'au niveau du tamis est de 1 500 cm³. La détermination de la viscosité se fait de la façon suivante :

1) Mettre son doigt sur l'extrémité de l'entonnoir et verser la boue à travers le tamis jusqu'à ce que le niveau atteigne le fond du tamis.

2) Enlever le doigt de l'orifice et mesurer au chronométré le temps nécessaire à l'écoulement de $946,35 \text{ cm}^3$ (1 quart) de boue par l'orifice. Le temps en secondes constitue la viscosité Marsh.

Pour l'essai normalisé API on étalonné l'entonnoir Marsh en remplissant l'entonnoir de $1\ 500 \text{ cm}^3$ d'eau douce propre a une température comprise entre 20 et 27° C (70 et 80° F), et on note le temps nécessaire à l'écoulement de $946,35 \text{ cm}^3$ (1 quart) d'eau par l'orifice. Ce temps doit être égal à $26 \pm 0,5$ s pour l'eau douce.

Avec un entonnoir propre non bosselle, on peut obtenir des résultats précis, en prenant la boue à la conduite, en la passant à travers le tamis et en faisant immédiatement la mesure d'écoulement au chronomètre.

- **Viscosimètre à mesure directe**

Les viscosimètres à mesure directe sont des instruments du type rotatif, entrâmes par un moteur électrique ou une manivelle. La boue se trouve dans l'espace annulaire entre deux cylindres. Le cylindre extérieur (ou rotor) tourne à une vitesse constante. La rotation produit un couple de torsion dans la boue qui se transmet sur le cylindre intérieur. Un ressort de rappel arrête le mouvement de ce cylindre. La tension sur le ressort est transmise à une aiguille. L'instrument entraîne par un moteur à 12 V (fig. III-3) à deux vitesses de rotation, 300 et 600 tr/mn . Un interrupteur, mettant hors circuit le régulateur de vitesse, permet un effet cisailant important, avant la mesure. Un bouton moleté permet de mesurer les résistances de gel. L'instrument a manivelle (fig. III-3) est de construction similaire a celle de l'instrument électrique. La manivelle permet également des vitesses de rotation de 300 et de 600 tr/mn . L'instrument a 115 V est entraîné par un moteur synchrone a deux vitesses afin de réaliser des vitesses de 3 , 6 , 100 , 200 , 300 et 600 tr/mn . La vitesse de 3 tr/mn est utilisée pour la détermination de la résistance de gel. Les caractéristiques des instruments ont été prévues de telle façon que la viscosité plastique et le seuil de cisaillement peuvent être obtenus à partir lectures à 300 et 600 tr/mn . La viscosité apparente est obtenue en divisant la lecture à 600 tr/mn par deux.

On mesure la viscosité plastique et le seuil de cisaillement au moyen de la procédure suivante :

1- Placer un échantillon de boue agité récemment dans le récipient prévu à cet effet et immerger le rotor exactement jusqu'a la ligne de repère.

2- Faire tourner le rotor à 600 tr/mn . Attendre que l'aiguille se stabilise (ce temps esfonction des caractéristiques de la boue). Noter la lecture a 600 tr/mn .

3- Passer à 300 tr/mn et attendre que l'aiguille se soit stabilisée. Noter la lecture à 300 tr/mn .

4- La viscosité plastique en centpoises (cPo) est égale a la différence entre les lectures a 600 et a 300 tr/mn . Le seuil de cisaillement en livres par 100 pieds carres ($1 \text{ bf} / 100 \text{ ft}^2$) est égal a la différence entre la lecture a 300 tr/mn et la viscosité plastique. La viscosité apparente en centpoises est égale a la moitié de la viscosité plastique.

Les mesures de résistance de gel se font de la façon suivante :

- 1- Placer l'échantillon de boue. Tourner à grande vitesse pendant 10 s.
- 2- Laisser reposer la boue sans la remuer pendant 10 s. Tourner lentement et régulièrement la manivelle jusqu'à obtenir une lecture. La lecture maximale est la résistance de gel initiale en lbf/100ft².
- 3- Agiter à nouveau la boue. Attendre 10 mn. Répéter l'opération ci-dessus. La lecture obtenue est la résistance de gel à 10 mn en lbf/100 ft².

- **Essais de filtration et de formation de cake**

- a- **Essai à 6,9 bars (100 psis)**

Une des propriétés les plus importantes de la boue est le taux de filtration ou le filtrat, qui donne une indication de la perte de fluide subie sous une pression donnée en face d'une formation préalable et sur la quantité de cake déposé sur les parois de la formation perméable. Les filtres-presses, tels qu'illustrés par la figure III.5, sont des instruments qui répondent aux spécifications de l'API pour la mesure de la filtration. La pression de gaz est fournie par une capsule de gaz carbonique (CO₂). Une modification des connexions permet également l'utilisation de l'air comprimé de l'installation de forage ou de gaz inerte en bouteilles. La procédure opératoire de l'essai de filtration est la suivante :

- 1- Assembler les parties du filtre-presse après les avoir nettoyées et séchées au moyen de papier de filtration sec.
- 2- Remplir le réservoir de boue jusqu'à environ 1 cm du bord supérieur. (Le remplissage à ras n'est nécessaire que si on désire économiser du gaz). Si l'air comprimé est disponible en quantité suffisante, la cellule peut n'être remplie que partiellement. (Ne pas utiliser d'oxygène par suite du danger d'explosion. On peut utiliser de l'azote à la place de l'air comprimé).
- 3- Mettre en place un cylindre gradué pour recevoir le filtrat. Appliquer la pression. Ne jamais ouvrir la vanne de gaz sur un régulateur de pression régie. Mettre la cellule sous pression en agissant sur la vis du régulateur.
- 4- Après 30 mn, purger la pression et mesurer la quantité de filtrat dans l'éprouvette graduée en ml. Enlever le papier de filtration avec le cake. Rincer soigneusement l'excédent de boue. Mesurer l'épaisseur de cake au mm près.

On utilise en général l'essai à 30 mn. Cependant, si le filtrat selon l'API est supérieur à 8 ml, on peut doubler le volume de filtrat obtenu après 7,5 mn pour obtenir une approximation du filtrat API. La durée de l'essai de filtration, si celui-ci est différent du temps normal de 30 mn, doit être enregistré sur le rapport de boue.

Outre l'épaisseur de cake, il y a lieu d'ajouter une note descriptive, lorsque le cake présente une texture médiocre, ou lorsque son épaisseur a augmenté au repos.

- b- **Essai de filtration à haute température**

Certains additifs réducteurs de filtration ont tendance à perdre leurs propriétés, s'ils sont soumis à des températures et des pressions élevées. Beaucoup de maîtres d'œuvre exigent à l'heure actuelle, que les essais de filtration soient effectués dans des conditions simulant les

conditions de fond en température et en pression. L'équipement utilisé à cet effet est d'un usage courant. L'instrument (fig. III-6) se compose essentiellement d'une source contrôlée de pression, d'une cellule conçue de façon à résister au moins à 69 bars (1 000 psis), d'un système de chauffage de la cellule et d'un cadre pour soutenir l'ensemble. Pour des essais de filtration à des températures supérieures à 93 °C(200 °F), une cellule pressurisée de récupération doit être attachée au tube d'évacuation.

La cellule à haute pression est équipée d'une gaine pour le thermomètre et d'un thermomètre, de joints résistants à l'huile et d'un support pour le papier filtre (Wattman n. 50 ou équivalent). Une vanne sur le tube d'évacuation contrôle l'écoulement du fluide de la cellule. Un gaz non dangereux, tel que l'azote ou le gaz carbonique, doit être utilisé comme source de pression. La procédure opératoire de l'essai de filtration à 150 °C (300 °F) est la suivante :

- 1- Brancher la gaine chauffante du réseau. Placer le thermomètre dans sa gaine. Pre-chauffer la gaine chauffante à 154 °C (310 °F). Régler le thermostat de façon à maintenir une température constante.
- 2- Prendre la boue à la conduite d'arrivée. Si nécessaire, préchauffer la boue tout en la remuant, jusqu'à 50, 55 °C.
- 3- Remplir la cellule jusqu'à 1 cm du bord supérieur, pour tenir compte de l'expansion
- 4- Placer la cellule dans la gaine chauffante, les deux vannes, supérieure et inférieure, étant fermées. Mettre en place le thermomètre dans sa gaine.

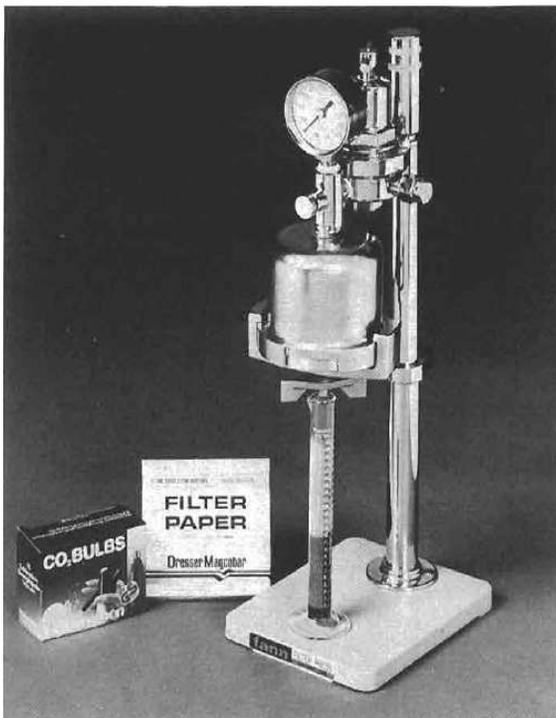


Fig. III-5. Différents appareils d'essai de filtration à basse pression

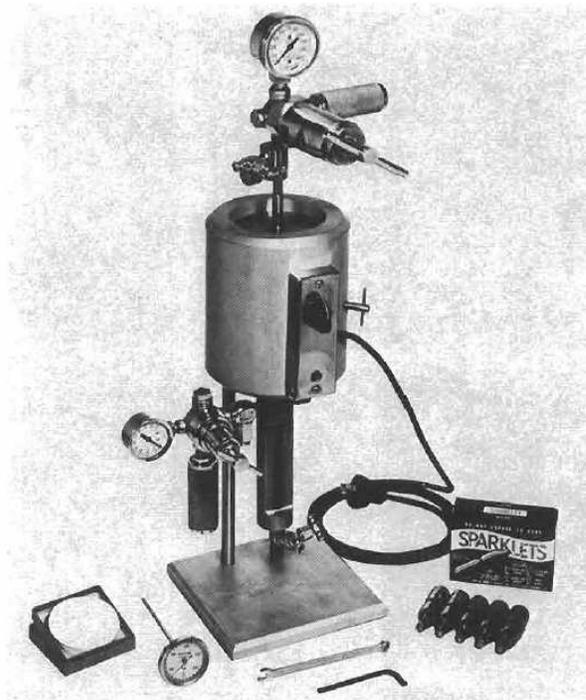


Fig. III-6. Appareil d'essai de filtration à haute température et haute pression

- 5- Placer l'équipement de pression sur la vanne supérieure et serrer. Mettre en place l'équipement de pression inférieur et serrer. Appliquer 7 bars (100 psi) sur les deux équipements de pression,

les deux soupapes étant fermées. Ouvrir la vanne supérieure et appliquer 7 bars (100 psi) à la boue pendant le chauffage.

6- Dès que l'échantillon atteint 150 ° C (300 ° F), augmenter la pression dans l'équipement de pression supérieur à 40 bars (600 psi). Ouvrir la vanne inférieure pour amorcer la filtration. Récupérer le filtrat pendant 30 mn en maintenant la température à ± 3 ° C (± 5 ° F). Si désiré, noter le volume de filtration instantanée après 2 s. Si la pression à la sortie augmente au-dessus de 7 bars (100 psi) pendant l'essai, réduire lentement la pression en sortant un peu de filtrat. Noter le volume total de filtrat.

7- Le volume de filtrat doit être corrigé pour une surface de filtration de 45,8 cm² (7,1 in²). (Si la surface de filtration est de moitié, doubler le volume du filtrat et noter).

8- A la fin de l'essai, fermer les deux vannes. Ouvrir la vis en T et purger la pression des deux régulateurs.

ATTENTION: La cellule de filtration est toujours sous une pression d'environ 45 bars. Maintenir la cellule en position verticale et la refroidir à température ambiante.

Si on utilise d'autres pressions et températures, noter les valeurs de ces deux paramètres. Si on désire déterminer la compressibilité du cake, on peut répéter l'opération en utilisant une pression à la partie supérieure de 14 bars (200 psi) et, une pression à la partie inférieure de 7 bars (100 psi).

1-b Appareillages de mesures

On appelle "rhéomètres" les appareils de mesure des propriétés rhéologiques des fluides selon la géométrie de l'outil de mesure et la sollicitation imposée au fluide. On distingue une large variété de rhéomètres

I.b.1 Rhéomètres capillaires

Il s'agit d'un instrument dont la partie principale est un tube dans lequel le matériau s'écoule. Il faut imposer à la suspension une différence de pression entre les deux extrémités du tube pour la faire s'écouler. Cette différence de pression permet de vaincre les frottements aux parois liés à la viscosité du matériau. A la distance r de l'axe du tube la contrainte de cisaillement s'écrit :

$$\tau(r) = \frac{r}{2} \cdot \frac{\Delta P}{L}$$

Où : L : longueur du tube.

. P : chute de pression.

Pour les fluides newtoniens, la loi de Poiseuille permet de calculer la viscosité :

$$\eta = \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot Q} \cdot \frac{\Delta P}{L}$$

Où : Q : débit du fluide.

R : rayon du tube

Afin de limiter l'influence du bord, la longueur L doit être assez grande devant le rayon R (L/R > 20).

Ce rhéomètre est utilisé essentiellement dans le cas des fluides newtoniens ou les fluides dont le comportement sont très peu différence de comportement newtonien.

I.b.2 Rhéomètres rotatifs de type cône – plan

La géométrie cône plan est constituée d'un disque et d'un cône tronqué de même diamètre et dont le sommet fictif est situé sur le disque. Le cône et le disque sont coaxiaux et animés d'un mouvement de rotation autour de leur axe commun à une vitesse relative .. Le matériau est placé en général sur le disque puis le cône est progressivement rapproché à la distance appropriée. Tout l'échantillon est soumis à un gradient de vitesse uniforme décrite par l'équation suivante :

$$\gamma = \frac{r}{h} \cdot \omega = \frac{\omega}{\text{tg} \alpha} = \frac{\omega}{\alpha}$$

Où : α : angle du cône.

Dans le cas de matériau newtonien, la contrainte peut être calculée par :

$$\tau = \frac{3M}{2\pi \cdot R^3}$$

Où : M : moment du couple appliqué.

R : rayon maximal du cône.

La viscosité s'exprime par :

$$\mu = \frac{3 \cdot \alpha \cdot M}{2\pi \cdot R^3 \cdot \omega}$$

Pour assurer un gradient de vitesse constant dans tous les échantillons, . doit être inférieur à 5°.

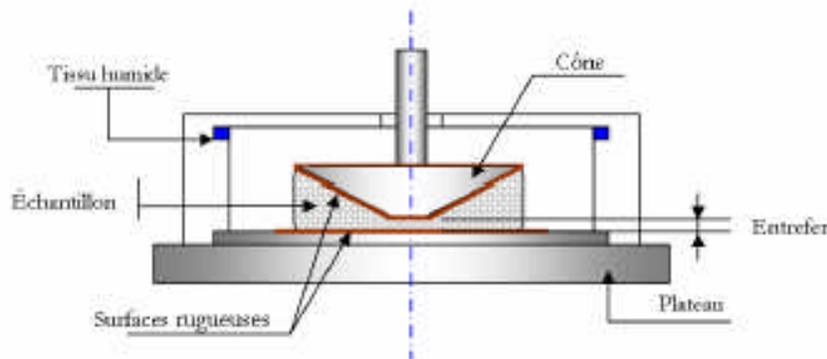


Figure III.7: Géométrie de mesure

I.b.3 Rhéomètres rotatifs de type plan – plan

Cette géométrie est composée de deux disques coaxiaux en rotation relative. L'échantillon est placé de la même façon que dans le cas de la géométrie cône - plan. Au contraire de ce que l'on a vu pour cette dernière, la géométrie plan - plan ne permet pas de contrecarrer les variations du gradient de vitesse au sein de l'échantillon en fonction de la distance par rapport à l'axe central. On a maintenant :

$$\gamma = \frac{r.\omega}{h}$$

Où : ω : vitesse angulaire relative de 2 disques.

H : l'entrefer ou la hauteur de l'éprouvette.

Les distributions du gradient de vitesse sont théoriquement identiques dans toutes les couches. Pour les fluides newtoniens, la viscosité peut être calculée par :

$$\mu = \frac{2.H.M}{4.\pi.R^4.\omega}$$

Où : R : rayon des disques.

Pour les matériaux Binghamiens, la relation suivante existe entre C et ω :

$$M = \frac{2\pi}{3}.R^3.\tau_0 + \frac{4.R^4.\mu}{2.H}\omega$$

I.b.4 Rhéomètres à cylindres coaxiaux

Le principe de fonctionnement de ce rhéomètre consiste à cisailier la substance comprise entre deux cylindres de révolution, coaxiaux de rayon R_1 et R_2 et de hauteur H (figure III.8). Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant à l'un des cylindres une rotation uniforme, vitesse ω_0 , l'autre cylindre demeurant immobile ou également en rotation à une vitesse angulaire différente de ω_0 .

La caractérisation du comportement rhéologique de la substance cisailée est obtenue par la détermination de la courbe $(\tau . \gamma)$, à partir des valeurs de couple fourni par le rhéomètre qui sont respectivement le moment résistant M et la vitesse de rotation du mobile ω_0 .

En régime d'écoulement laminaire uniforme, on calcule aisément la contrainte de cisaillement à la paroi d'un cylindre :

$$\tau = \frac{M}{2\pi.R^2.H}$$

Où, R et H sont respectivement le rayon et la hauteur du cylindre.

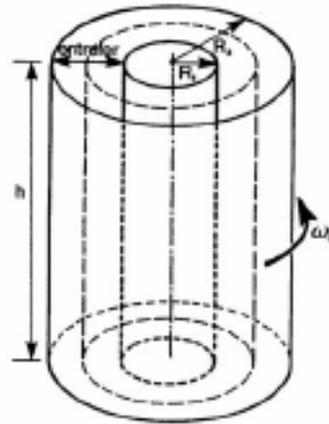


Figure III.8 : Rhéomètre à cylindres coaxiaux

Par contre la détermination du gradient de vitesse γ (ou vitesse de cisaillement) est plus complexe car ce paramètre dépend des propriétés rhéologiques du matériau. Ce paramètre est donné par :

$$\gamma(r) = r \frac{d\omega}{dr}$$

Où $d\omega$ est la vitesse de déplacement angulaire entre deux couches situées à une distance radiale r et espacées de dr .

On remarque que la connaissance de ω , est insuffisante à la détermination de $\gamma(r)$. Il faut en outre connaître la loi de répartition de la vitesse angulaire $\omega(r)$. Or cette répartition est une fonction des propriétés rhéologiques du matériau. On est donc en présence d'un cercle vicieux: "pour déterminer le comportement rhéologique il serait nécessaire de le connaître préalablement".

Ceci constitue une des grandes difficultés rencontrées en rhéologie expérimentale. Pour maîtriser cette difficulté, une mise en oeuvre de certaines procédures expérimentales et approximations mathématiques sont adoptées.

II- Comportement rhéologique de la boue.

Les boues sont des fluides non newtoniens, ce qui signifie que vitesse de cisaillement et contrainte de cisaillement ne varient pas linéairement. La description du comportement rhéologique des boues fait donc appel aux diverses modélisations multi-paramètres présentées au chapitre II. Quatre types de comportement distincts de la boue sont référencés dans la bibliographie, ceux-ci font l'objet d'une présentation .

II.1 Comportement rhéofluidifiant.

Un fluide rhéofluidifiant voit sa viscosité décroître avec le cisaillement qui augmente, le liquide devient moins visqueux et donc plus fluide lorsque le cisaillement croît. Les modèles d'Ostwald et de Sisko sont les plus souvent utilisés pour décrire le comportement en écoulement d'échantillons de boue. Sutapa (1996) montre que l'indice d'écoulement n du modèle d'Ostwald augmente avec la concentration en MES, c'est-à-dire que le caractère fluidifiant de la boue devient plus évident avec l'augmentation de la concentration de la boue. Chavarria (1980) détermine les coefficients d'un modèle similaire à celui d'Ostwald qui décrit directement la viscosité apparente en fonction du gradient de vitesse pour des échantillons de boues. Moeller et Torres (1997) utilisent le modèle d'Ostwald pour caractériser des boues. Ils montrent que ces différents types de boue ont des propriétés fluidifiantes différentes en étudiant notamment la variation des paramètres K et n . Il est à noter que certains auteurs interprètent conjointement les résultats de mesures rhéologiques selon un modèle rhéofluidifiant et plastique (Lotito *et al.* 1997 ; Manoliadis et Bishop 1984) et recherchent la modélisation fournissant les meilleures corrélations possibles pour décrire l'écoulement de la boue. Toutefois, dans le cas de boues concentrées, certains auteurs considèrent que le comportement rhéofluidifiant ne se manifeste que pour des contraintes de cisaillement minimales (Slatter, 1997).

II.2 Comportement plastique.

Le comportement plastique des boues est d'autant plus marqué que la concentration volumique en matière solide est élevée. Les modèles de Bingham et de Herschel-Bulkley sont alors les plus employés pour décrire ce comportement de la boue. La définition du seuil d'écoulement de la boue reste très différente selon les études considérées, ainsi, Spinosa et Lotito (2003) proposent pour des suspensions synthétiques une valeur de contrainte critique $\tau_c = 30$ Pa, l'utilisation du modèle de Bingham pour des concentrations en solides supérieures à 20 g.L⁻¹. Slatter (1997) utilise pour sa part le modèle d'Herschel-Bulkley pour des boues et trouve une valeur $\tau_c = 2$ Pa pour une teneur en solide de 31,7 g.L⁻¹. Monteiro (1997), une valeur τ_c variant de 0,3 à 1 Pa. Dollet (2000) utilise le modèle de Bingham pour décrire le comportement de boues faiblement concentrées et montre la sensibilité de ce paramètre à la différence de nature de la boue selon son origine de prélèvement, il considère que la contrainte critique ne devient évidente qu'à partir de concentrations en MES supérieures à 3 g.L⁻¹ et prend une valeur de l'ordre de 0,15 Pa. La nature de la boue et plus particulièrement son état de floculation peuvent aussi favoriser l'apparition d'un seuil d'écoulement à des valeurs de MES variables, ainsi, Dentel *et al.* (2000) travaillant sur des boues conditionnées voient la contrainte de cisaillement varier avec la dose de polymère ajoutée.

Les résultats obtenus sont donc très disparates concernant la définition de la valeur du seuil d'écoulement, les auteurs s'accordent pour dire que la détection de cette contrainte critique est d'autant plus aisée que la teneur en MES est élevée. La fluctuation des valeurs de τ_c proposées dans les différentes études trouve en grande partie pour origine la sensibilité de l'appareillage utilisé. La définition d'un seuil de contrainte à très faibles MES peut aussi se heurter à des problèmes d'artefacts de mesure tels des glissements aux parois ou bien des problèmes de sédimentation dans la cellule susceptibles de créer des gradients de concentrations induisant une forte erreur de mesure.

II.3 Comportement thixotrope.

La thixotropie témoigne de l'importance de l'histoire mécanique antérieure du matériau dans la détermination de son comportement rhéologique (Coussot et Grossiord 2001). Un fluide thixotrope possède en général un caractère rhéofluidifiant qui se manifeste par une diminution de la viscosité lors de la montée en vitesse de cisaillement (ou en contrainte de cisaillement). Les effets de cette fluidification ne se produisent pas en totalité lors de l'application du cisaillement mais peuvent être différés dans le temps. La déstructuration induite par le cisaillement se manifeste de façon différée, ce qui se traduit par des rhéogrammes résultant de montée et descente linéaire en vitesse de cisaillement qui est asymétriques, la courbe de descente se situant en dessous de celle de montée en vitesse de cisaillement. Un liquide thixotrope régénère sa structure après un temps de repos suffisant.

Les boues sont reportées comme étant des fluides présentant des propriétés thixotropes (Yen *et al.* 2002 ; Forster 1982 ; Battistoni 1997). Ce genre de comportement est à même de rendre encore plus difficile la détermination des caractéristiques rhéologiques des boues (Dentel 1997). En particulier, le seul fait d'introduire la boue dans la cellule de mesure soumet l'échantillon à une certaine contrainte qui fait que l'on ne peut pas toujours observer le comportement réel de la boue et éluder le comportement faiblement thixotrope de certains échantillons ou bien induire des artefacts de mesure. Pour éviter cela, certains auteurs préconisent l'emploi d'un pré conditionnement des échantillons par application d'une phase de pré cisaillement identique de façon à permettre l'homogénéisation des mesures (Baudez 2001).

Le caractère thixotrope de certains échantillons de boues a été étudié et exploité par certains auteurs. Ainsi, Battistoni (1997) décrit la thixotropie de la boue comme résultant de l'énergie dépensée par la rupture de liaisons solide-solide au sein des floccs structurés. Il quantifie ce phénomène par la surface d'hystérèse développée par des rhéogrammes résultant de l'application d'une montée-descente linéaire en vitesse de cisaillement. Dagot *et al.* (2001) montrent un caractère fortement thixotrope d'échantillons de boues filamenteuses. Il en est de même pour Yen *et al.* (2002) sur des échantillons de boues flocculées à l'aide d'un polyélectrolyte cationique. Dans les deux cas, le paramètre surface d'hystérèse est utilisé comme indicateur de la thixotropie des échantillons de boues en relation avec leur état de floculation bien particulier.

II.4 Comportement viscoélastique.

Les matériaux viscoélastiques ont dans certaines conditions des caractéristiques analogues à celles de corps élastiques (non fluides) et dans d'autres conditions des caractéristiques de fluides simplement visqueux. Plus précisément, lorsqu'une sollicitation leur est imposée pendant une durée très courte, leur réponse est essentiellement élastique, c'est-à-dire que la déformation résultante est proportionnelle à la contrainte appliquée. Par contre, lorsqu'une sollicitation leur est imposée pendant une durée assez longue, leur réponse est essentiellement visqueuse, c'est-à-dire qu'ils s'écoulent plutôt qu'ils ne se déforment.

Assez peu d'études menées sur des boues mentionnent l'utilisation de modèles viscoélastiques pour décrire leur comportement rhéologique. Les boues ne peuvent présenter un tel

comportement qu'à de fortes teneurs en matière solide. Sutapa (1996) utilise de telles mesures sur des boues activées concentrées (33 g.L-1) pour déterminer la valeur de la contrainte critique de cisaillement. Baudez (2001) se sert de mesures en dynamique pour confirmer les résultats obtenus en cisaillement simple sur des boues pâteuses. Il définit, en fonction de valeurs seuils de contrainte, le modèle d'écoulement suivi par la boue.

Chapitre IV :

Etude expérimentale

ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DE LA BOUE

1- INTRODUCTION

Nous venons de voir que les lois de comportement rhéologique des boues sont difficiles à définir sur le plan théorique et que l'expérience reste actuellement la seule voie à suivre.

C'est dans cet objectif que nous allons déterminer expérimentalement le comportement rhéologique de la boue à base huile dans les forages pétroliers, déterminer les pertes de charges en fonction de la concentration de la boue.

Notre étude est faite sur des échantillons de trois boues à base d'huile (AVA, BASP, MI) dans les forages pétroliers du Sud d'Algérie (cas les forages de Hassi Messaoud).

Cette étude est faite dans deux laboratoires différents :

- Dans les compagnies étrangères des boues au sud d'Algérie (MI, BASP, AVA).
- LMMC laboratoire de des matériaux et minéraux composée à université Mohamed Bouguerra de Boumerdés.

2 - PRESENTATION DES ECHANTILLONS :

2.1- Formulation

Dans cette étude trois échantillons de boues de forage à base d'huile 16" ont été utilisés et dont les formulations sont données dans les tableaux IV.1, IV.2, IV.3

Tableaux IV.1: Formulation de la boue AVA

gasoil	eau	Bentooil SA	PE	SE	Chaux	NaCl	FC	VS	Baryte
625	279	12	10	10	30	101	5	4	38
1	1	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg

Tableaux IV.2: Formulation de la boue MI

gasoil	eau	V coat	V wet	VG 69	Chaux	NaCl	Baryte
640	270	11,4	7,1	27	28	95	47,7
1	1	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg

Tableaux IV.3 : Formulation de la boue BASP

gasoil	Invermul	Ezmul	Geltone	Barablok	Chaux	eau	Nacl	baryte
623,27	16	6	12	4	25	277,22	98,29	78,82
l	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg

2.2- Définition de chaque composant de la boue

Boue MI :

VERSACOAT HF

L'agent tensioactif organique VERSACOAT HF est un additif multifonctionnel qui sert d'émulsifiant et d'agent mouillant dans les systèmes de boue d'huile de VERSA. Cette version particulière a été formulée avec un point d'inflammabilité beaucoup plus élevé pour l'usage dans les secteurs qui exigent ce dispositif supplémentaire de sûreté. Les avantages secondaires incluent la stabilité thermique et la haute température améliorée, commande à haute pression de la filtration (HTHP). Le produit est efficace sur une large gamme de températures, en présence des contaminants, et pour réduire les effets nuisibles de la contamination de l'eau.

VERSAWET

L'agent tensioactif organique VERSAWET est un agent concentré et puissant de mouillage d'huile pour des boues à base d'huile. Il est employé principalement en fluide détendu - perte, les systèmes de boue d'huile de la basse chaux VERSA emploient VERSACOAT comme émulsifiant. VERSAWET est un excellent agent mouillant qui est particulièrement efficace dans les systèmes utilisant du FER-Ox (hématite) difficile à humidifier. Il est également efficace avec la baryte de mouillage d'huile et les solides de forage, ainsi que pour réduire les effets nuisibles de la contamination de l'eau.

VERSATROL

La gilsonite de VERSATROL est un asphalte d'occurrence normal utilisé pour la commande de filtration de HTHP dans tous les systèmes à base d'huile de VERSA. Elle est souvent employée pour sceller les formations à basse pression. Elle est compatible avec tous les systèmes de VERSA et peut être employée dans la formulation initiale ou être ajoutée plus tard.

VG-69

L'argile VG-69 organophile est un viscosifiant et agent gélifiant utilisé dans les systèmes à base d'huile VERSA et les systèmes à base synthétique NOVA. Cette bentonite traitée par AMINE est employée pour augmenter la capacité de charge et les propriétés de suspension, fournissant l'appui pour des matériaux de poids et des aides améliorées de déplacement de découpages. VG-69 aide également à la formation du FILTER-CAKE et à la commande de la filtration.

CHAUX

La chaux hydratée et la chaux éteinte sont toutes deux des noms communs pour l'hydroxyde de calcium $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Il est utilisé comme source de calcium et alcalinité en fluides de forage d'eau base et de huile base. La CHAUX, un produit chimique commercial largement disponible, est une source économique du calcium (Ca^{2+}) et d'ions hydroxydes (OH^-).

Les applications comme liquide de forage de la chaux incluent :

- L'augmentation du pH ;
- Fourniture de la chaux en excès comme amortisseur d'alcalinité
- Flocculation des boues de bentonite;
- Enlèvement des ions solubles du carbonate (CO_3^{2-});
- Contrôle de la corrosion et activation gras-acide, additifs de boue à base d'huile.

ATTENTION:

La chaux est une base forte et formera des solutions (Alcalines) à pH élevé.

CHLORURE DE SODIUM

Le nom commun du CHLORURE DE SODIUM (NaCl) est du sel, largement le produit chimique commercial que disponible est un produit économique pour formuler les fluides solides libres clairs de Travailler plus et d'accomplissement. Les demandes liquides de forage de sel incluent: densité croissante. Inhibition croissante de schiste en diminuant la dissolution de sel de réduire d'activité de l'eau en forant le halite salez le réduire de section le point de congélation des fluides d'eau base et pour réduire le potentiel de former des hydrates de gaz dans le percement en eau profonde.

BARYTE DE MI

Le matériel de poids de BARYTE de MI est une haute - forage de qualité - barytine de catégorie (sulfate de baryum) employée pour augmenter la densité des fluides de forage. Ce minerai de haute spécifique pesanteur est le matériau le plus largement répandu de poids, à l'application dans tous les systèmes liquides de forage et répond à toutes les caractéristiques d'api pour la barytine.

2.3- Préparation de la boue

Les étapes de préparation de boue peuvent s'inscrire comme suit :

- Ajouter la chaux, le versable et le versacoat au carburant diesel.
- Ajouter le chlorure de sodium à l'eau dans un autre puits.
- Ajouter l'eau de saumure au mélange de carburant diesel et cisailier la pendant 2 heures.
- Ajouter VG-69 et le cisailier pour une autre heure.
- Ajouter VERSAWET et le cisailier pendant 15 minutes.
- Ajouter enfin la barytine à la densité désirée de boue. Il est conseillé d'ajouter la moitié de la quantité du VERSAWET avant d'ajouter la barytine et puis ajouter la deuxième moitié après pesé.

- MATERIEL UTILISE

La caractérisation rhéologique des boues de forage à base d'huile a été effectuée à l'aide de deux rhéomètres, l'un à contrainte et à vitesse de cisaillement imposées (AR2000) et le deuxième (Fann 32) équipé de géométrie couette cylindrique.



Figure IV.1 : Rhéomètre AR2000

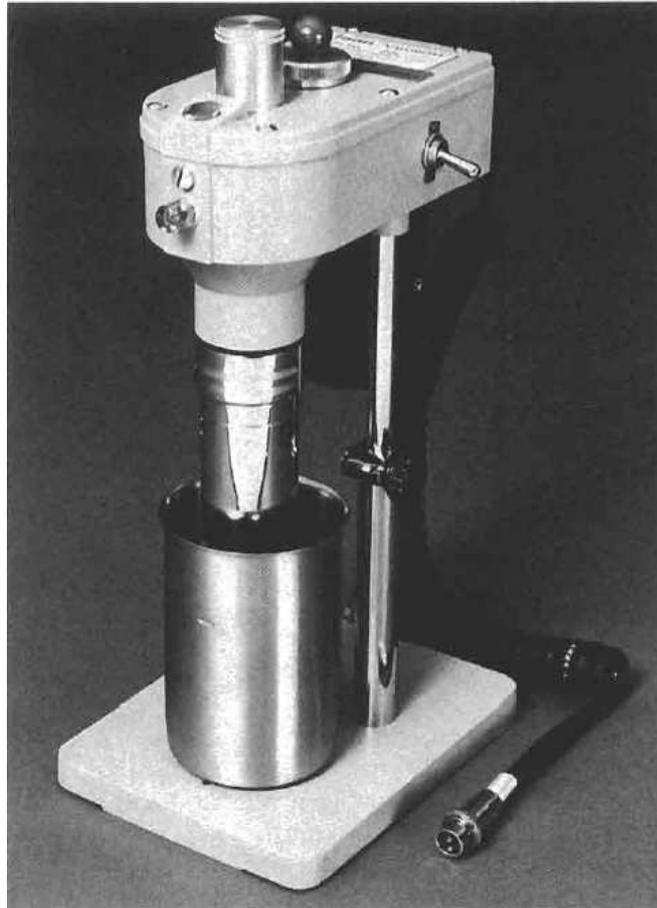


Figure IV.2 : Rhéomètre FANN 32

4- EXPERIMENTATION POUR LES MESURES RHEOLOGIQUES

L'objet des mesures rhéologiques est la détermination expérimentale, à partir de grandeurs macroscopiques (couples, vitesse..) de loi de comportement de notre boue. Cette loi relie le tenseur des taux de déformation au tenseur de contraintes, qui sont des grandeurs indépendantes des volumes de matériaux étudiés. Souvent, cette recherche se réduit à une relation entre la contrainte tangentielle de cisaillement notée τ , et le gradient de vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$.

Dans notre étude, on déterminera le comportement rhéologique de la boue sous différentes concentrations.

Nous avons utilisé pour cette étude deux rhéomètres AR2000, et FANN 32. Ils sont conçus pour effectuer des tests à vitesse imposée et à contrainte contrôlée. C'est un rhéomètre à cylindres coaxiaux.

- Le premier rhéomètre AR2000 est composé de deux cylindres en rotation l'un par rapport à l'autre. Dans notre cas, le cylindre intérieur est fixé et le cylindre extérieur est mobile. Il est relié par une station qui permet de donner tous les résultats rhéologiques sur cette boue.
- le deuxième rhéomètre FANN 32 est identique au premier, mais les résultats sont relevés manuellement.

Canevas des essais

➤ Préparation des échantillons

Nous avons pris des tubes d'essais, et nous les avons remplis de 20 ml de la boue à tester à différentes concentrations.

➤ Réglage du rhéomètre

L'équilibre du rhéomètre est réglé automatiquement sur la station, et on entre les données sur la boue.

Nous imposons par programmation différentes vitesses de rotation qui nous donnent les différents taux de déformation, ainsi que le temps de test (pour le AR2000), et le manuel pour le FANN 32.

➤ Essais

Pour chaque concentration, nous introduisons la boue dans le cylindre extérieur à l'aide d'une seringue, nous la déposons sur sa base dans le rhéomètre. Nous fixons le cylindre intérieur, puis nous le faisons automatiquement descendre pour le faire rentrer dans le cylindre extérieur avec une grande précision.

Nous mettons le rhéomètre en marche, le cylindre intérieur tourne avec des vitesses croissantes (taux de déformations croissant).

Pour chaque vitesse de rotation, nous suivons des valeurs les contraintes, ainsi que les valeurs de la viscosité apparente.

Afin d'avoir la stabilité, et afin de nous permettre de prendre la mesure, nous avons pris une minute pour chaque vitesse de rotation pour le AR2000.

Ainsi, on fait toutes ces étapes manuellement, et on détermine les graphes de $\tau = f(\dot{\gamma})$ ainsi que la viscosité apparente (la pente du graphe) à partir du logiciel Excel.

5- EXPERIMENTATION POUR LES MESURES HYDRAULIQUES

➤ Matériel

Dans cette étape, on utilise un simulateur qui permet de déterminer les caractéristiques hydrauliques (pression, débit, pertes des charges) à partir des conditions de puits (profondeur, géométrie, température) et des résultats rhéologiques qu'il faut introduire manuellement.

➤ Essais

Pour chaque concentration, nous introduisons les résultats rhéologiques (τ , $\dot{\gamma}$), et différents débits, les conditions de géométrie du forage, et le simulateur nous donne ensuite les graphes :

- Des pertes de charges en fonction du débit.
- De la pression en fonction du débit.

Chapitre V :

**INTERPRETATION DES
RESULTATS**

Introduction

Nous présenterons dans ce chapitre les résultats obtenus sur les caractéristiques rhéologiques pour différentes boues à base d'huile utilisées en Algérie : MI, PASP et AVA.

- Les essais effectués au LMMC de Boumerdes au AR2000 nous ont permis d'obtenir des rhéogrammes $\tau=f(\dot{\gamma})$ et la courbe de variation $\mu=f(\dot{\gamma})$ pour différentes concentrations allant de 0 à 5 g/l pour la boue de MI et de 0 à 3 g/l pour la boue de BASP.

- Le FANN 32 effectuée à Hassi Messaoud, nous donne dix courbes $\tau=f(\dot{\gamma})$ pour la boue MI à concentration variant de 0 à 3 g/l, pour la boue BASP 0 à 2 g/l et pour la boue AVA de 0 à 3 g/l.

Nous donnerons quelques interprétations de résultats qui aboutiront à des conclusions et recommandations.

Résultats d'essais et interprétation

1- Lois rhéologiques en fonction de la variation de la concentration en g/l

a- Résultats du AR2000 :

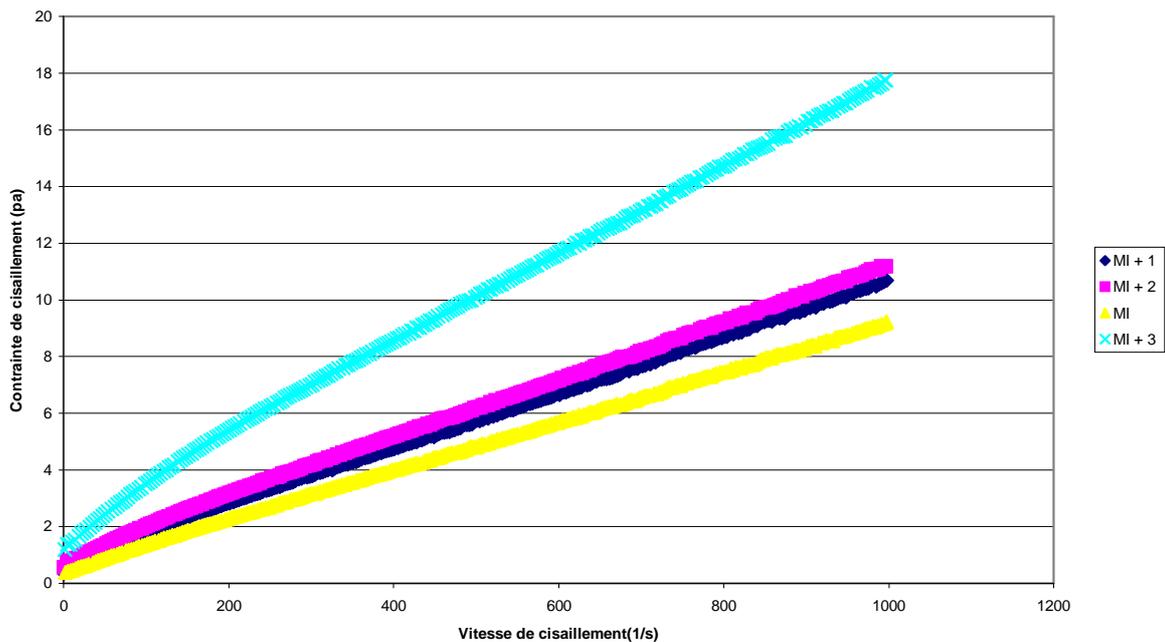


Figure V.1.a : Rhéogramme $\tau=f(\dot{\gamma})$ de la boue MI à différentes concentrations

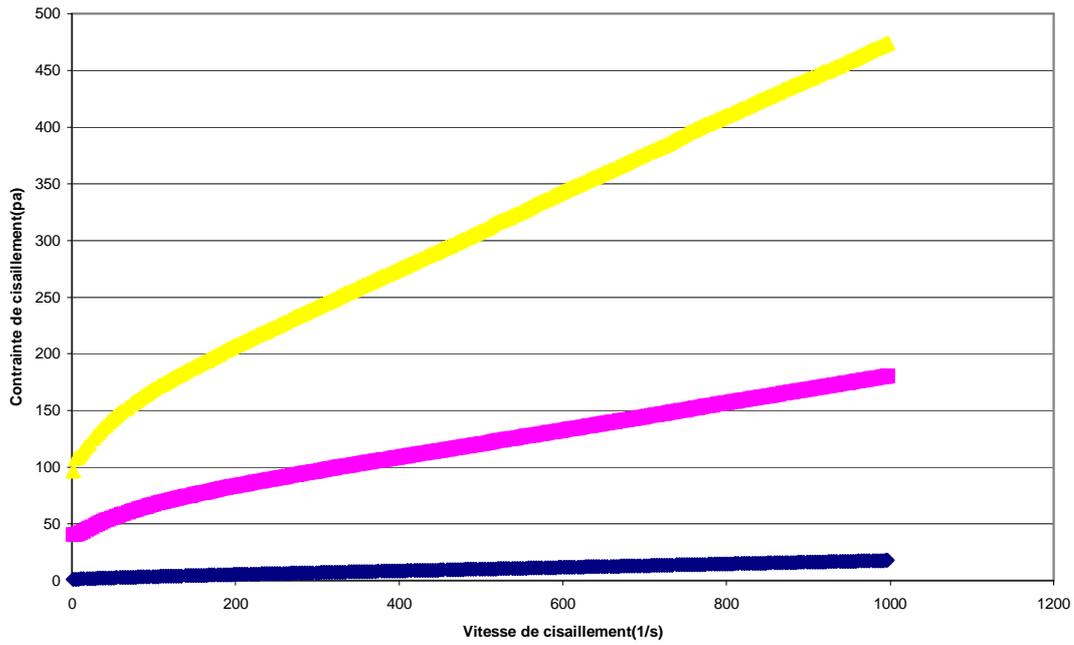


Figure V.1.b : Rhéogramme $\tau=f(\dot{\gamma})$ de la boue MI à différentes concentrations

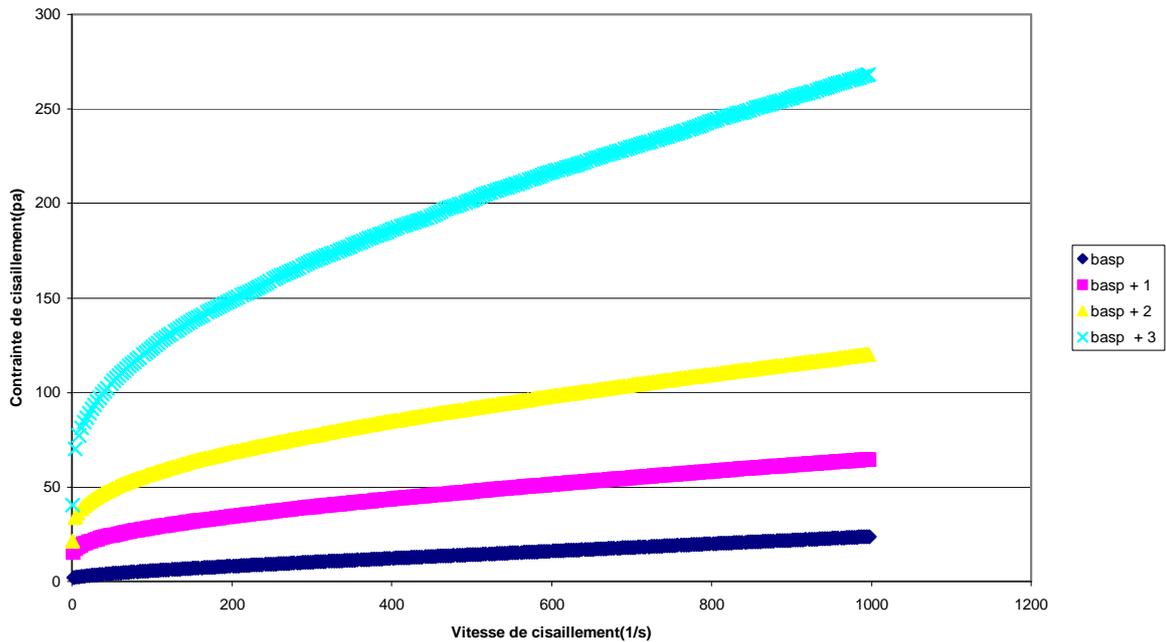


Figure V.2 : Rhéogramme $\tau=f(\dot{\gamma})$ de la boue BASP à différentes concentrations

b- Résultats de FANN 32 :

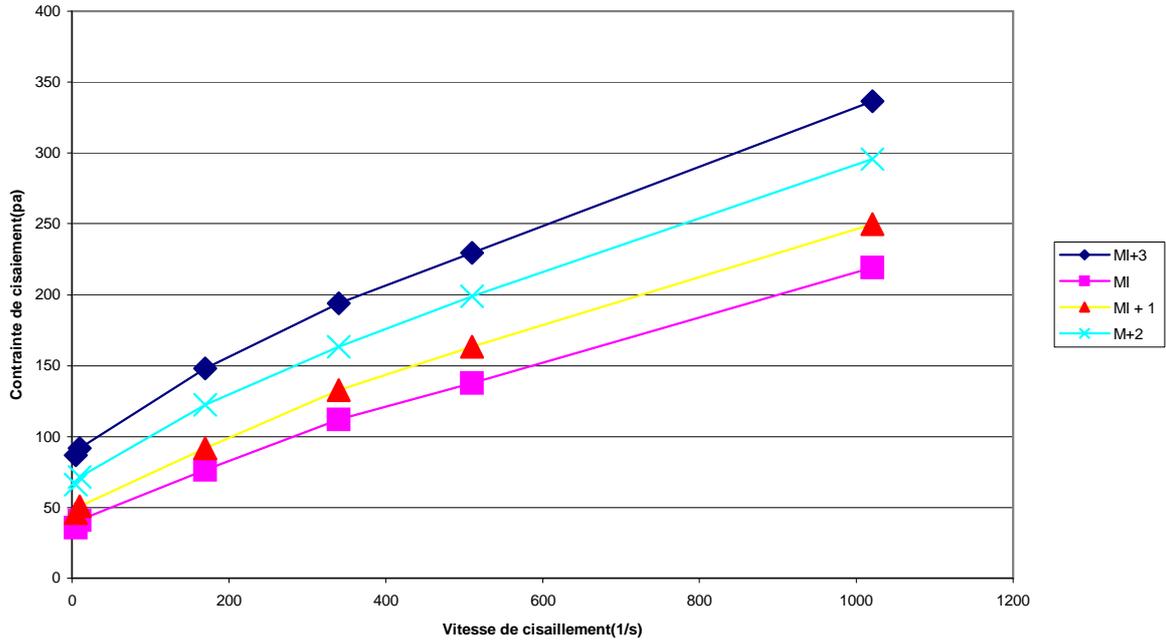


Figure V.3 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI à différentes concentrations

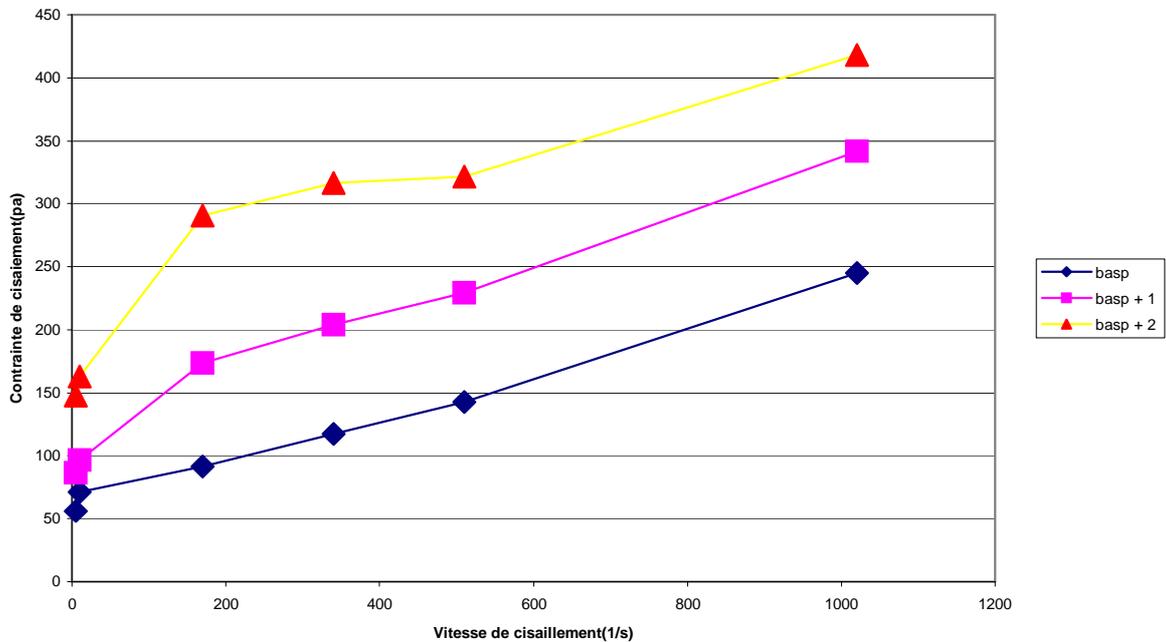


Figure V.4 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue BASP à différentes concentrations

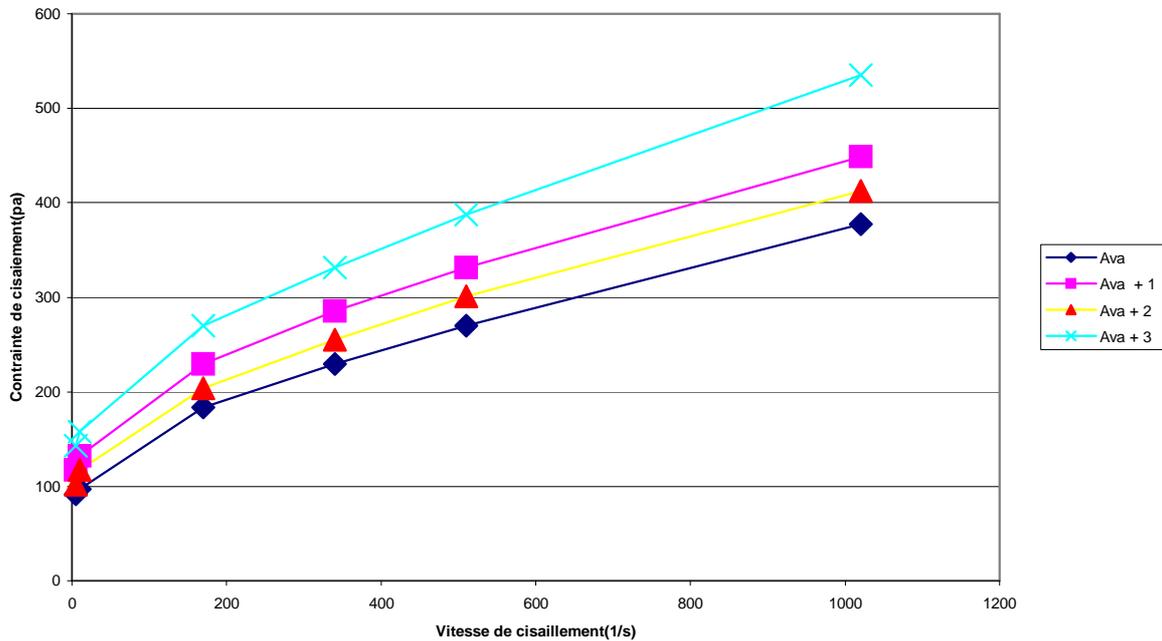


Figure V.5 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue AVA pour différentes concentrations

A partir des graphes ci-dessus, nous avons pu lier les caractéristiques rhéologiques obtenues par le AR2000

	Yield value τ_B (Pa)	Viscosité μ ou K (1/s)	modèle
MI	0,5028	0,008696	Bingham
MI+1	0,6768	0,01214	Herschel Bulkley
MI+2	0,7725	0,01694	Herschel Bulkley
MI+3	1,364	0,03568	Herschel Bulkley

	Yield value τ_B (Pa)	Viscosité μ ou K (1/s)	modèle
Basp	1,425	0,01334	Casson
Basp+1	16,39	0,6967	Herschel Bulkley
Basp+2	29,39	2,460	Herschel Bulkley
Basp+3	61,99	5,094	Herschel Bulkley

NB :

Bingham : $\tau = \tau_B + \mu_B \cdot \gamma$

Herschel Bulkley : $\tau = \tau_B + K \cdot \gamma^n$

Casson : $\tau^{\frac{1}{2}} = \tau_B^{\frac{1}{2}} + (Kc \cdot \gamma)^{\frac{1}{2}}$

Interprétation

- AR2000 : A partir des graphes (figure V.1a au V.2), on peut dire que les deux boues (MI, BASP) se comportent comme un fluide de Bingham pour des concentrations inférieures à 1g/l .A partir de 1g/l ,on voit que le comportement tend vers celui du fluide Herschel Bulkley. La viscosité n'est plus constante mais varie légèrement en fonction du taux de cisaillement.
- Au FANN 32 : pour ces graphes les résultats ne sont pas aussi précis que les premiers, mais on remarque le même comportement rhéologique pour les trois échantillons (MI, BASP, AVA).

2- Variation de la viscosité en fonction de la concentration

- Ces résultats donnés par le AR2000 permettent d'obtenir le graphe viscosité-vitesse de cisaillement pour deux boues (MI, BASP) et pour différentes concentrations. (Voir figure V.6 et V.7).

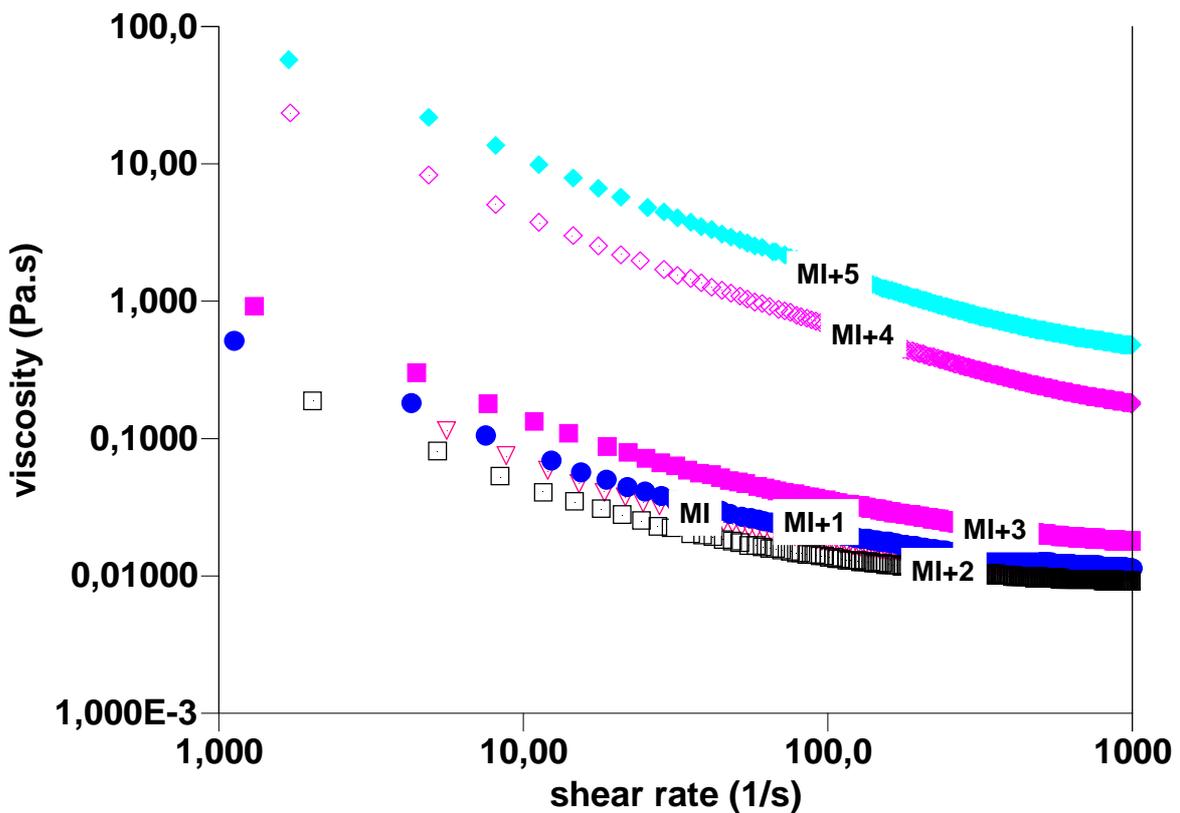


Figure V.6 : Rhéogramme $\mu = f(\gamma)$ de la boue MI pour différentes concentrations

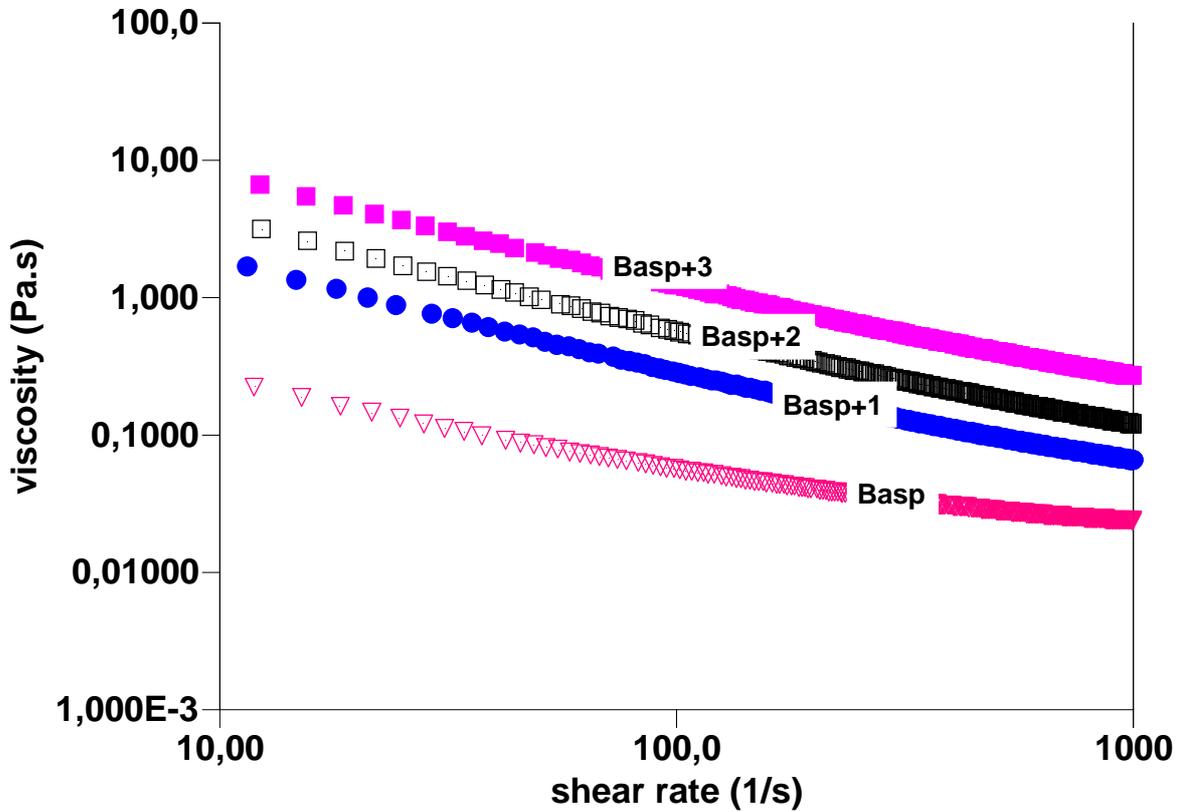


Figure V.7: Rhéogramme $\mu = f(\dot{\gamma})$ de la boue BASP pour différentes concentrations

Interprétation :

- On constate, à partir des graphes (figures V.6 et V.7), que la viscosité apparente diminue en fonction de l'augmentation de la concentration, jusqu'à atteindre une valeur critique (viscosité constante, cas de fluide Newtonien), et ceci pour les deux échantillons de boue (MI, BASP)

3- Comparaison entre les trois échantillons de boues :

a- La variation des caractéristiques rhéologiques en fonction de la variation de la concentration

a.1- Résultats AR2000 :

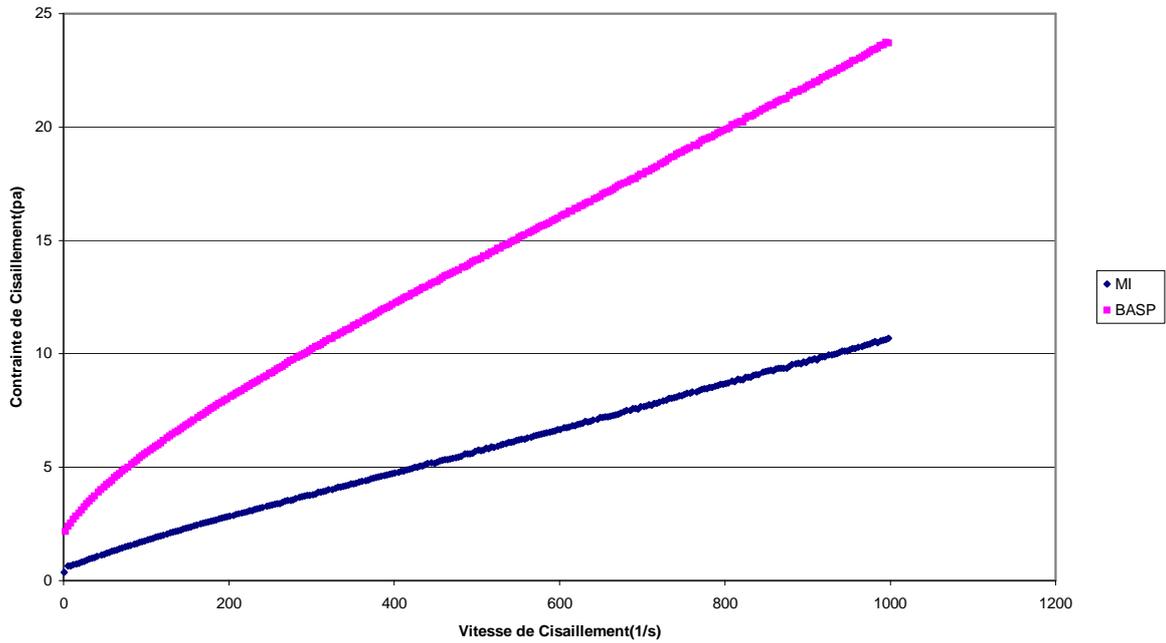


Figure V.8 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP initial

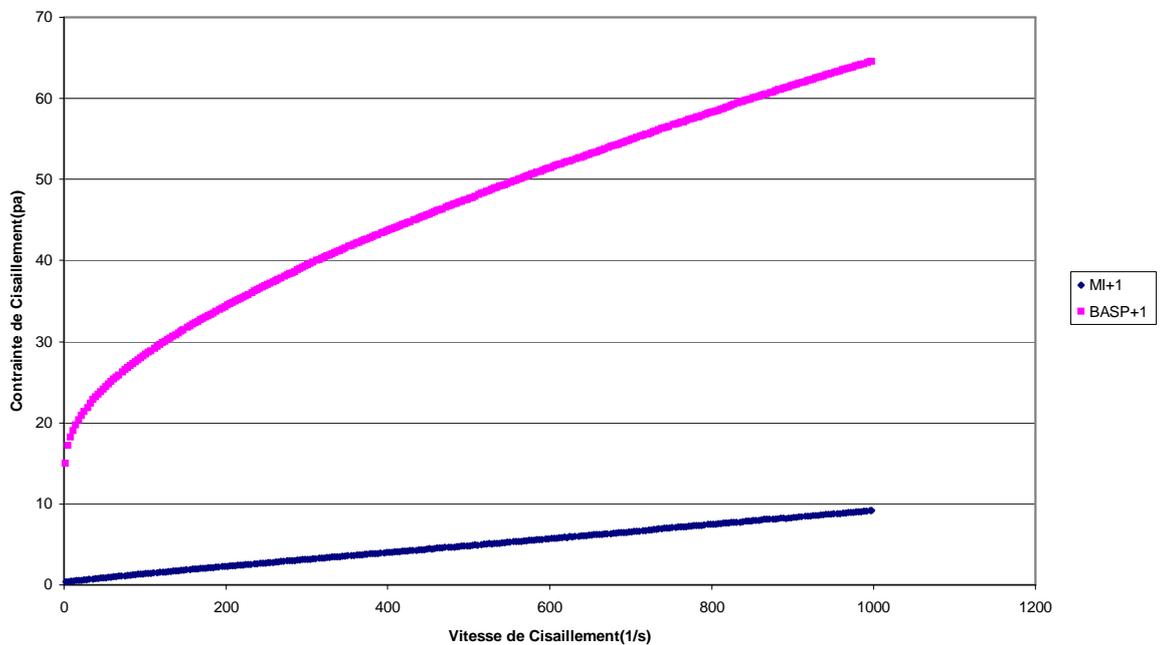


Figure V.9 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour une concentration de 1g/l

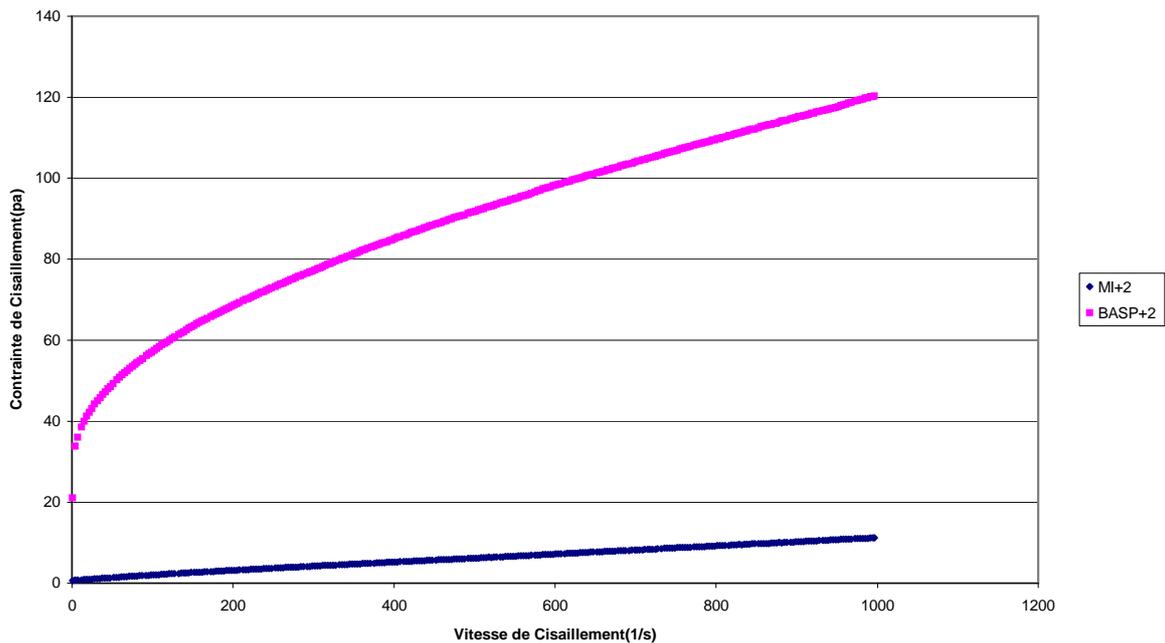


Figure V.10 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour 2g/l

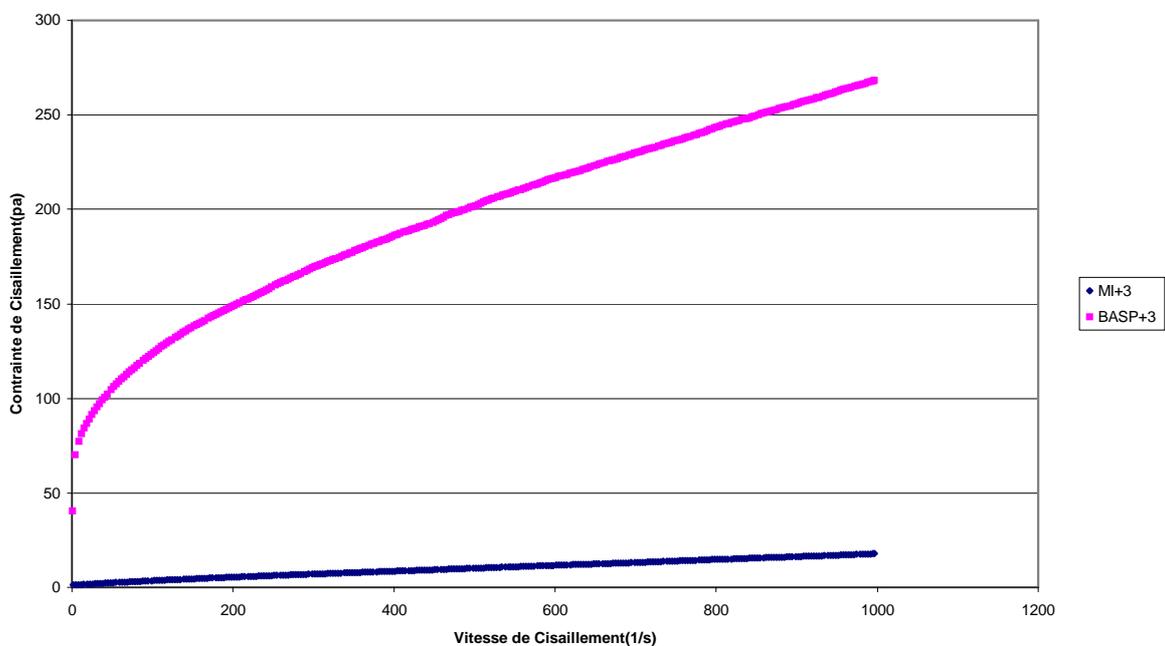


Figure V.11 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour 3g/l

a.2- Résultats FANN 32 :

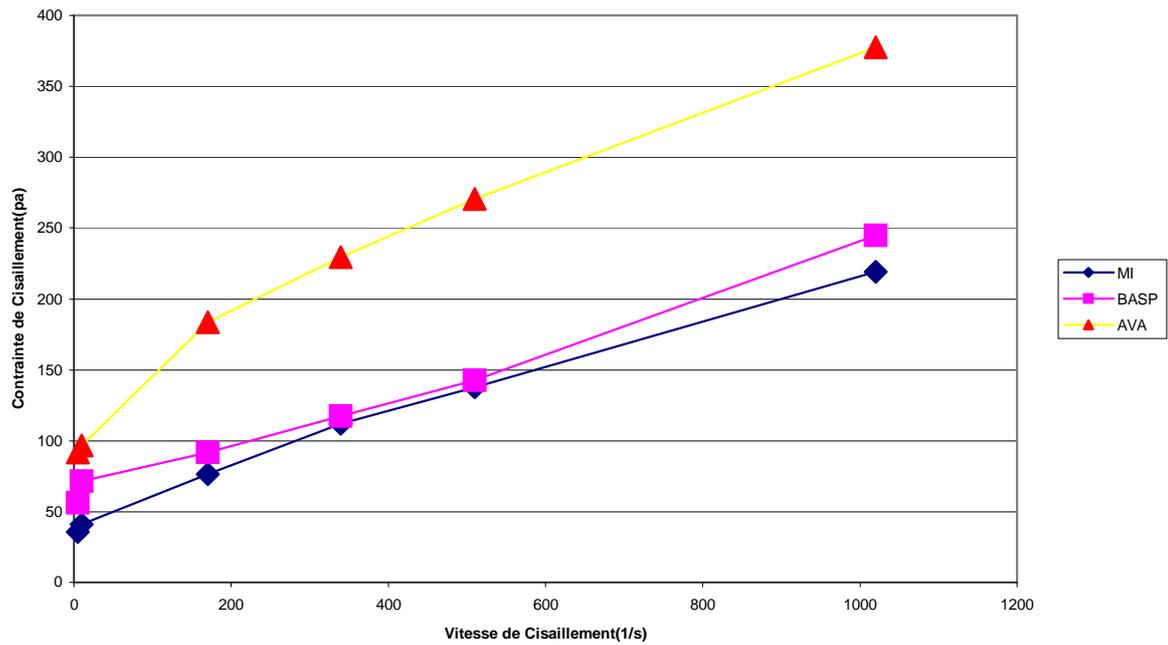


Figure V.12: Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI, BASP et AVA initial

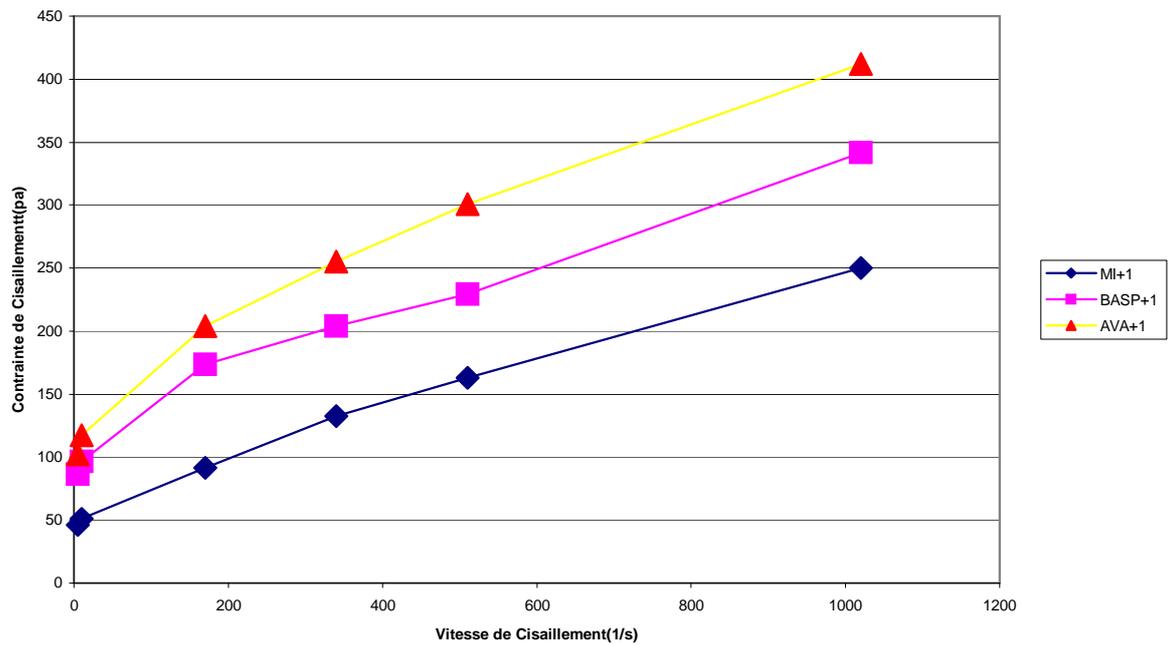


Figure V.13 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI, BASP et AVA pour 1 g/l

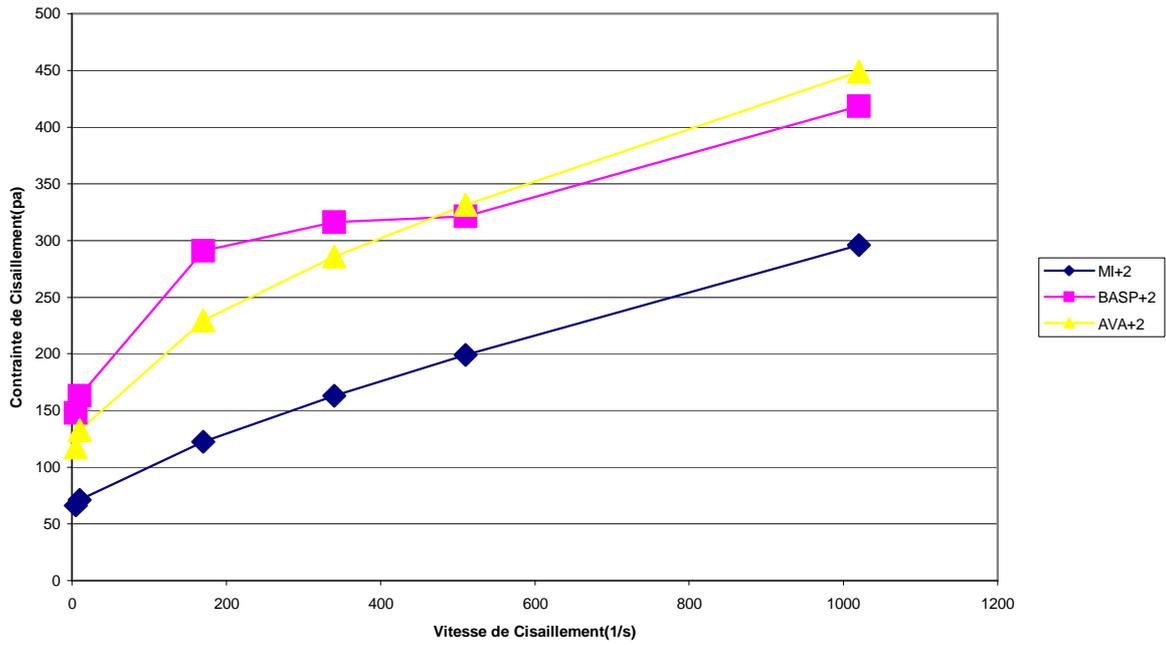


Figure V.14 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI, BASP et AVA pour 2g/l

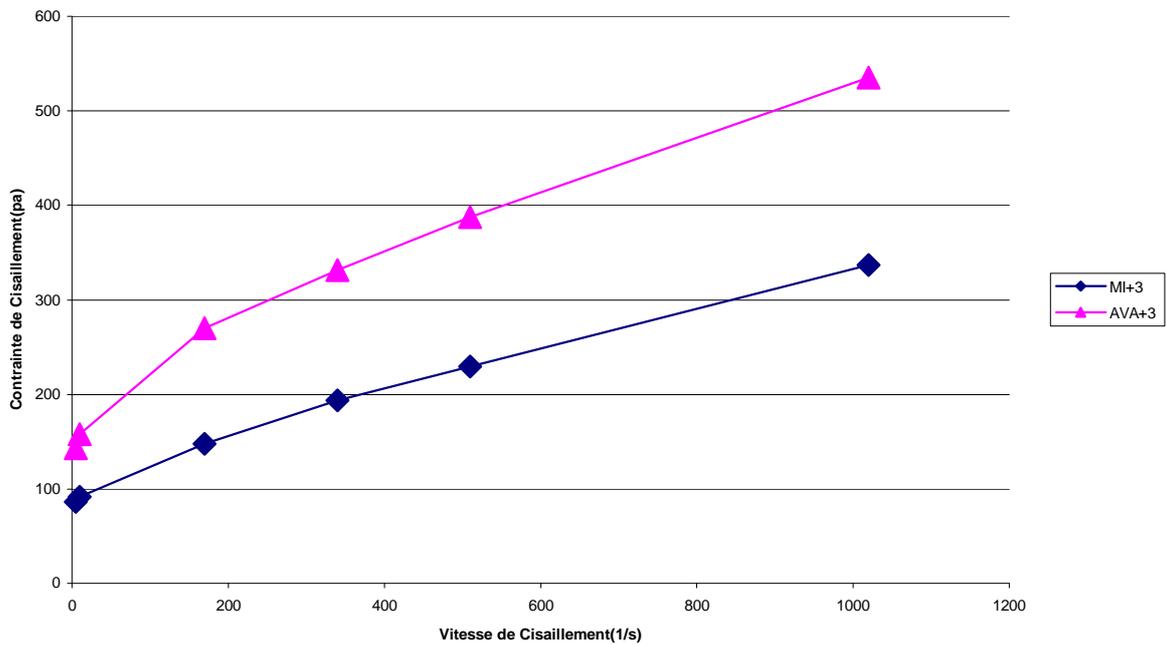


Figure V.15 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue MI et AVA pour 3g/l

Interprétation :

A partir des graphes (V.8 au V.15) on voit que les trois boues (MI, BASP, AVA) se comportent est de la même façon, mais les grandeurs de la contrainte critique et le coefficient (n) ne sont pas les mêmes, chaque boue ayant sa propre formulation.

La boue AVA est plus visqueuse que la BASP et la MI, car son viscosifiant est plus concentré que les deux autres viscosifiants.

A vitesse de cisaillement est constante, et quelques soit la concentration, la contrainte de cisaillement de la boue BASP est plus importante que celle du MI. Ces résultats obtenus au AR2000 sont confirmés par le second essai, ou la boue AVA à une contrainte critique plus grande que BASP.

b- La variation de la viscosité en fonction de la variation de concentration

b.1- Résultats du AR2000 :

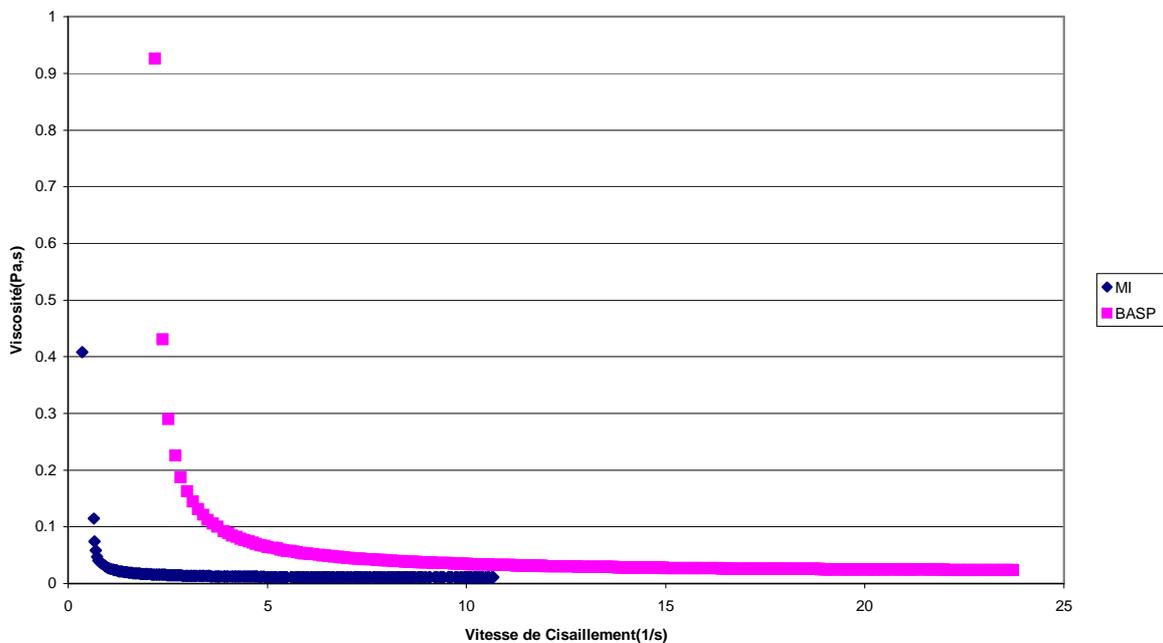


Figure V.16 : Courbe $\mu = f(\gamma)$ de la boue MI et BASP initial

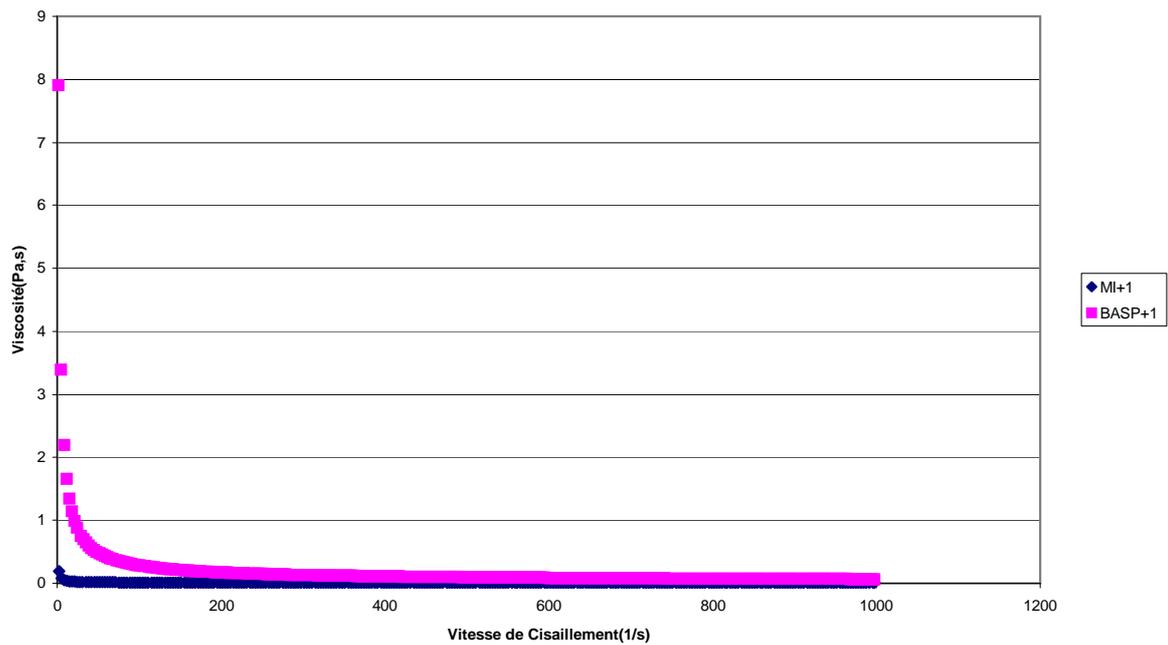


Figure V.17 : Courbe $\mu = f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour 1g/l

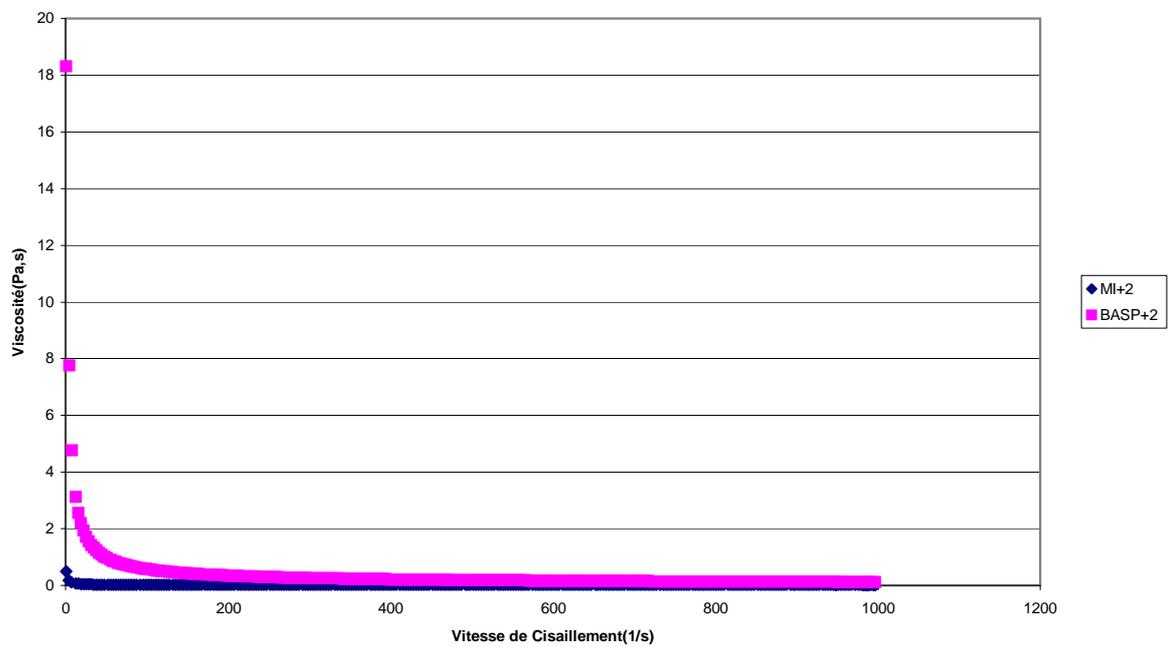


Figure V.18 : Courbe $\mu = f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour 2g/l

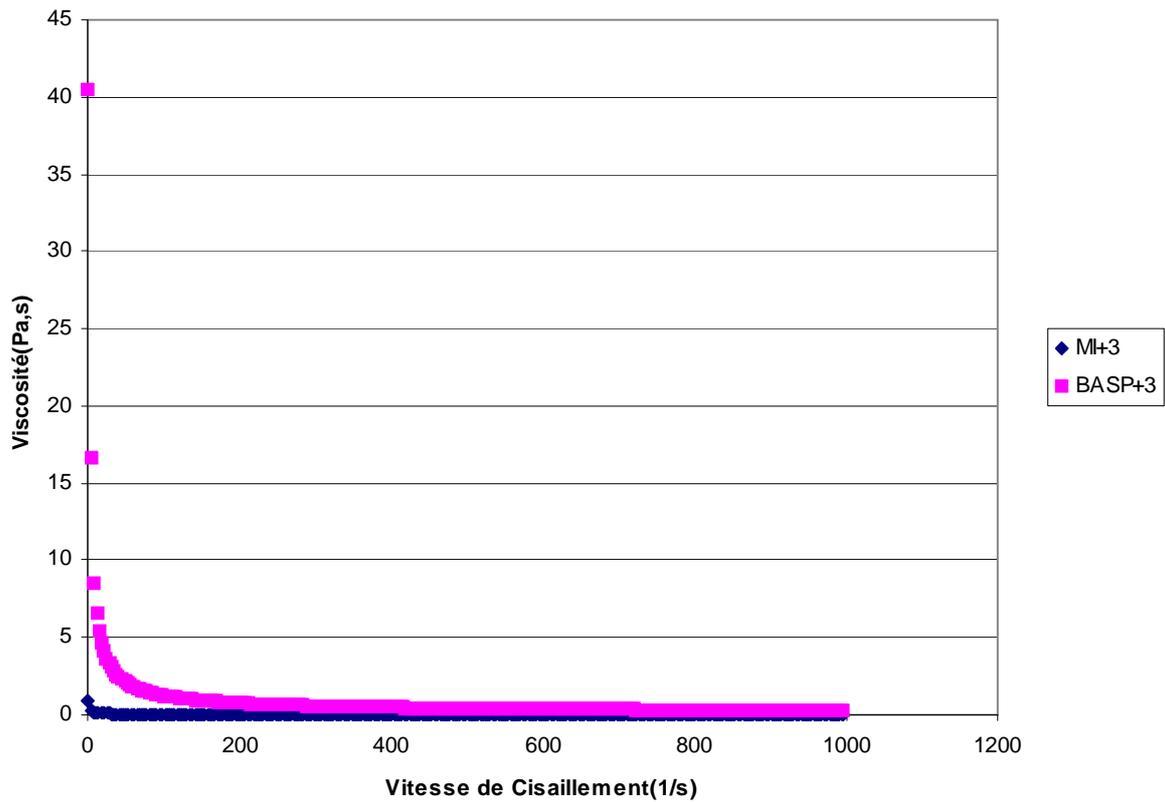


Figure V.19 : Courbe $\mu = f(\gamma)$ de la boue MI et BASP pour 3g/l

Interprétation :

La loi de comportement est identique pour les deux boues avec variation des caractéristiques rhéologiques en fonction de la concentration.

La viscosité de la boue MI se stabilise plus rapidement que celle de la boue BASP qui a besoin d'une sollicitation plus grande pour se stabiliser ; ceci est dû à sa concentration en « huile ».

4- Caractéristiques rhéologiques (τ_0 , μ) de la boue BASP en fonction de la variation du rapport huileux O/W :

Nous présenterons dans cette partie et pour différents rapports huile/eau (O/W) pour la boue BASP les rhéogrammes :

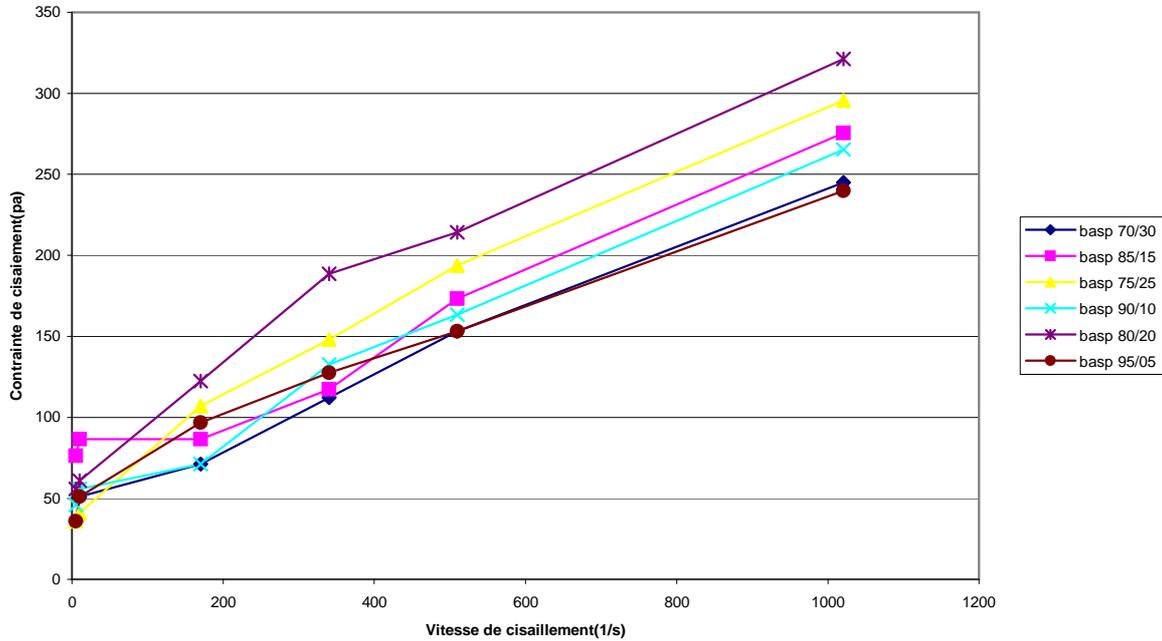


Figure V.20 : Rhéogramme $\tau=f(\gamma)$ de la boue BASP pour différents rapports huileux

Interprétation :

On remarque à partir de ce graphe, que la vitesse de cisaillement, ainsi la viscosité (pente du courbe) diminuent quand le rapport huileux augmente, les fluides doivent être très liquides quand on ajoute le gasoil.

5- Variation des pertes de charges en fonction de la concentration :

Nous avons aussi déterminé la variation de la perte de charge et de la pression en fonction du débit pour les boues AVA et MI, et pour différentes concentrations allant de 0 à 3 g/l par pas de 1. Les résultats sont présentés dans les figures V.21 à V.24.

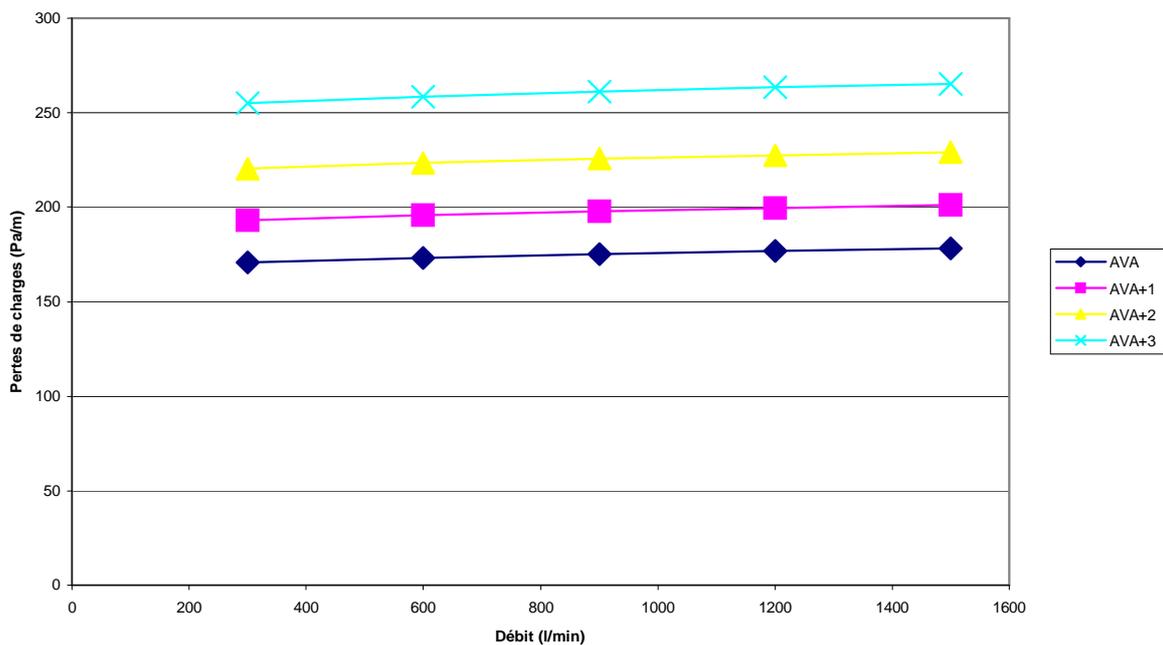


Figure V.21 : Courbe $\Delta h=f(Q)$ de la boue AVA pour différentes concentrations

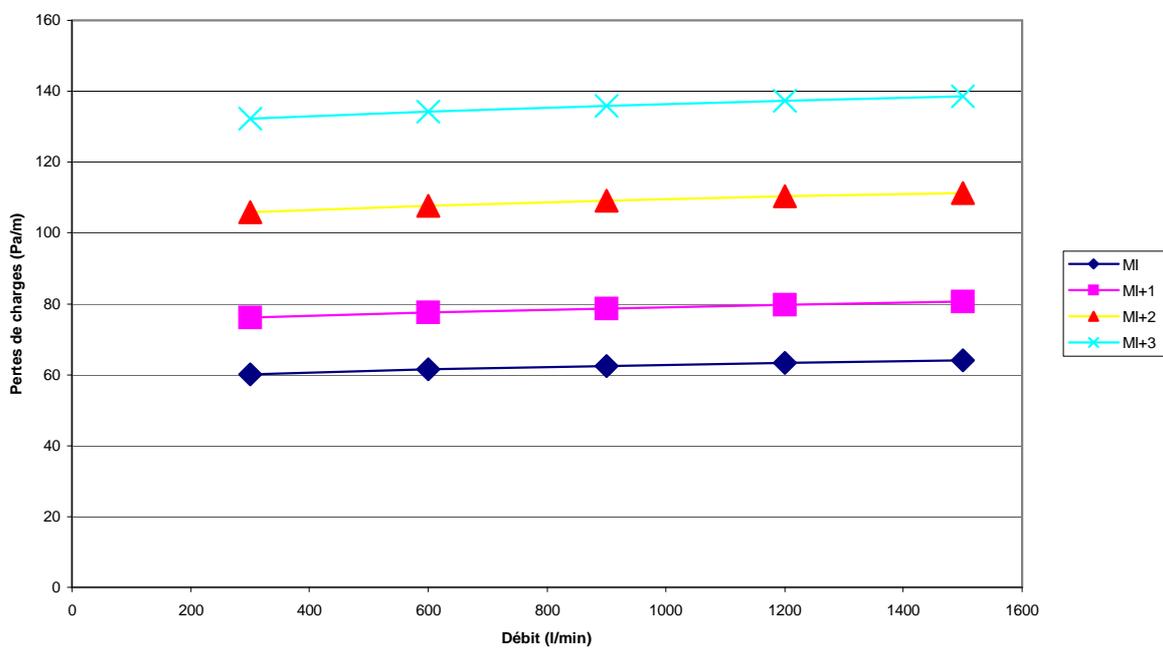


Figure V.22 : Courbe $\Delta h=f(Q)$ de la boue MI pour différentes concentrations

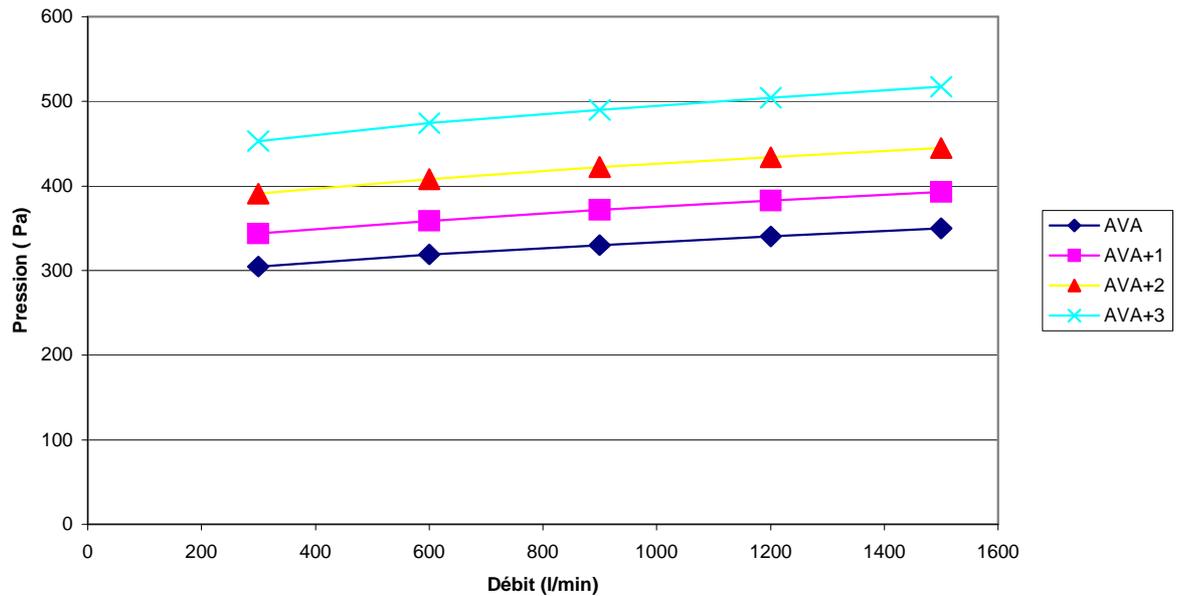


Figure V.23 : Courbe P=f(Q) de la boue AVA pour différentes concentrations

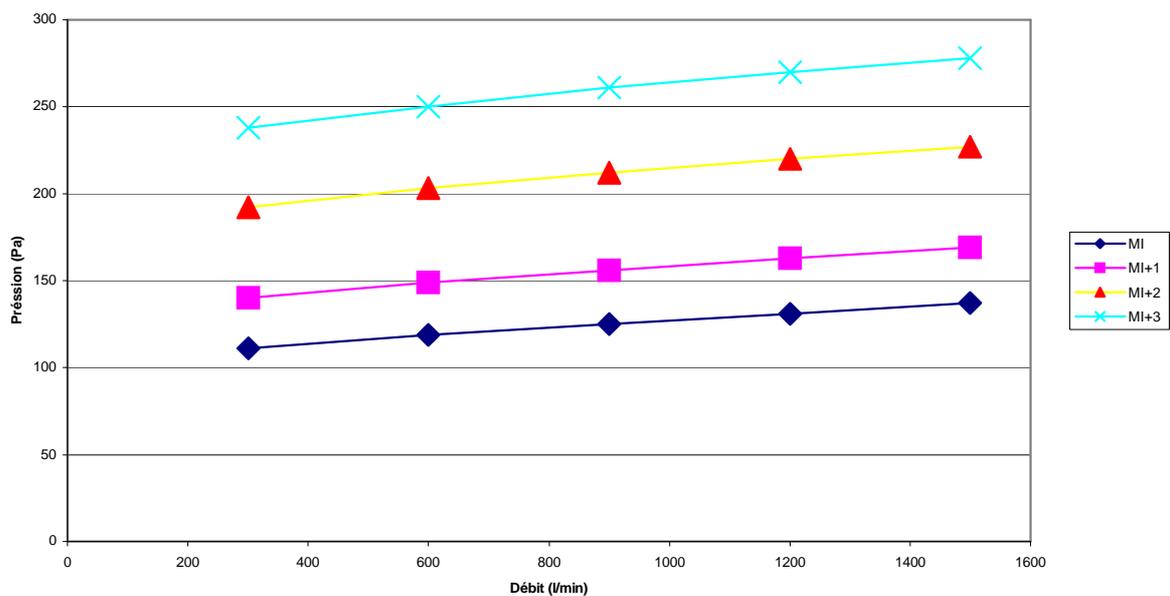


Figure V.24 : Courbe P=f(Q) de la boue MI pour différentes concentrations

Interprétation :

A partir de l'équation de **Navier stockes**, on peut déduire que les pertes de charges et la pression varient en fonction de la viscosité (voir chapitre II). Ceci peut se voir sur les résultats trouvés à partir d'un simulateur de boue de forage de la société Schlumberger ; les pertes de charge augmentent quand la viscosité augmente, ainsi que la pression.

CONCLUSION

CONCLUSION

L'objectif principal de mémoire était d'arriver à une caractérisation des propriétés rhéologiques de boue de forage à base d'huile, et de contribuer à comprendre la relation entre les propriétés rhéologiques mesurées et l'écoulement de ces boues.

Nous avons commencé par une synthèse bibliographique sur les différents types de boues, leur composition, leurs caractéristiques physiques et chimiques ainsi que la rhéologie des fluides en général et particulièrement les boues de forage. Il en ressort que la littérature actuelle est très riche de contributions traitant, d'une part, les propriétés rhéologiques de ces fluides à structure, et d'autre part, la nature des interactions entre leurs composantes.

Néanmoins, la relation entre les propriétés rhéologiques et l'écoulement des boues de forage à base d'huile n'a pas été bien établie. Ainsi, cette analyse bibliographique nous a servi à comprendre l'origine des propriétés rhéologiques des fluides étudiés (boue à base d'huile 16"), souvent utilisés dans les forages.

La partie expérimentale s'est intéressée à l'étude rhéologique des boues à base d'huile. Le but était de mieux comprendre ce système, à différentes concentrations. Dans cette partie, le modèle d'Herschel-Bulkley a permis de reproduire d'une manière satisfaisante le comportement de ces boues, ainsi que le modèle de Casson dans des cas très spécifiques. Quant au modèle de Bingham, il semblait mieux adapté pour des concentrations très faibles.

On peut aussi dire que le rapport huileux peut jouer un rôle très important sur les caractéristiques rhéologiques des boues à base d'huile, car si on change le pourcentage d'huile par rapport à l'eau, la boue réagit différemment et peut même changer complètement de type.

Concernant l'écoulement de la boue dans le forage, on peut dire que c'est un écoulement de Poiseuille dans un cylindre.

Le régime est permanent car les boues sont des fluides très lourds.

Le changement de la concentration augmente les pertes de charges. Ce qui influence négativement sur la stabilité de l'écoulement.

A partir de ces résultats, on peut dire que l'écoulement de la boue de forage à base d'huile est rhéofluidifiant, et le modèle de Herschel-Bulkley semble le plus précis.

Ce travail pourrait être approfondi et complété, notamment dans deux directions :

- Modélisation de la thixotropie et, expérimentalement, essais zéta métriques. En effet, nous estimons que l'association de différentes techniques filtrat, granulométrie, zétamétrie serait intéressante et,
- L'utilisation d'autres types de boue (à cause de la confidentialité de ce produit, qui est le premier facteur de la réussite de forage nous n'avons pas pu avoir accès à d'autres boues ni les formuler nous mêmes).

BIBLIOGRAPHIE

- Benchabane.A ,2006: ” Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères”, thèse du doctorat .France.
- Pevere.A, 2006: ”Apport des Mesures Rhéologiques a L’Etude des Biomasses Epuratoires Granulaires Anaérobies ”, thèse du doctorat .France .
- Battistoni P., Pavan P., Alvarez M.J., Prisciandaro M., Cecchi F. 2000. Rheology of sludge from double phase anaerobic digestion of fraction of municipal solid waste. *Water Sci. Technol.*, 41:51-59
- Baudez J.C., Ayol A., Coussot P. 2004. Practical determination of the rheological behaviour of pasty biosolids. *J. Environ. Manag.*, 72:181-188
- Chavarria F.E. 1984. Etude rhéologique des suspensions de floccs biologiques. Université du Languedoc, Ph.D. thesis
- Coussot P., Grossiord J.L. 2001. Comprendre la rhéologie de la circulation du sang à la prise du béton. Edition EDP SCIENCES
- Dentel S.K, 1997. Evaluation and role of rheological properties in sludge management. *Water Sci. Technol.*, 36:1-8
- Drilling Fluids Processing Handbook, ASME Shale Shaker Committee, edition ELSEVIER 2005.
- Forster C.F. 1982. Sludge surface and their relation to the rheology of sewage sludge suspensions. *J. Chem. Technol. Biot.*, 32:799-807
- Guibaud G., Tixier N., Baudu M. 2005. Hysteresis area, a rheological parameter used as a tool to assess the ability of filamentous sludges to settle. *Process biochem.*, 40:2671-2676
- H.C.H.Darley, 1988.George R.Gray, Composition and properties of Drilling and Completion Fluids, Fifth Edition.
- Lolito V., Spinosa L., Mininni G., Antonacci R. 1997. The rheology of sewage sludge at different steps of treatment. *Water Sci. Technol.*, 36:79-85
- Benghanem.A, 2003:”Etude Expérimentale du Comportement Rhéologique et Hydrodynamique des Matières en Suspension “, thèse de magistère, France.

BIBLIOGRAPHIE

- Midoux N, 1988. Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimique .Technique et documentation, éditeur Lavoisier, 2ième édition, p 513

- Moeller G., Torres L.G, 1997. Rheological characterization of primary and secondary sludges treated by both aerobic and anaerobic digestion. *Bioresource. Technol*, 61:207-211

- Monteiro P.S. 1997. The influence of the anaerobic digestion process on the sewage Sludges rheological behaviour. *Water Sci. Technol.*, 36:61-67

- P. François et F. Lawniczak Modélisation aux temps courts de l'évolution de viscosité d'une suspension de bentonite initialement déstructurée.

- Seyssiecq I., Ferasse J.H et Roche N, 2003. State-of-the-art: rheological characterization of wastewater treatment sludge. *Biochem. Eng. J.*, 16:41-56

- Slatter P.T, 1997. The rheological characterization of sludges. *Water Sci.Technol.*, 36:9-18

- Spinosa L., Lolito V, 2003. A simple method for evaluating sludge yield stress. *Adv. Environ. Res.*, 7:655-659

- Sutapa I.D.A. 1996. Propriétés physico-chimiques et décantabilité des boues activées en relation avec le transfert d'oxygène et la biofloculation. Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine

- Tixier N. 2003. Approche des propriétés rhéologiques de suspensions biologiques floculées. Thèse Limoges

- Tixier. N., Guibaud. G., Baudu. M., 2003a. Towards a rheological parameter for activated sludge bulking characterisation. *Enzyme Microb. Tech.*, 33:292-298

- Tixier N., Guibaud G., Baudu M. 2003b. Determination of some rheological parameters for the characterization of activated sludge. *Bioresource. Technol.*, 90:215-220

- Yen P.S., Chen L.C., Chen C.Y., Wu R.M., Lee D.J, 2002. Network strength and dewaterability of flocculated activated sludge. *Water Res.*, 36:539-550

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

Résultats de FANN 32 :**basp 70/30**

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		244,8
300		510		153
200		340		112,2
100		170		71,4
6		10.2		51
3		5.1		35,7

basp 75/25

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		295,8
300		510		193,8
200		340		147,9
100		170		107,1
6		10.2		40,8
3		5.1		35,7

basp 80/20

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		321,3
300		510		214,2
200		340		188,7
100		170		122,4
6		10.2		61,2
3		5.1		56,1

basp 85/15

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		275,4
300		510		173,4
200		340		117,3
100		170		86,7
6		10.2		86,7
3		5.1		76,5

basp 90/10

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		265,2
300		510		163,2
200		340		132,6
100		170		71,4
6		10.2		56,1
3		5.1		45,9

basp 95/05

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		239,7
300		510		153
200		340		127,5
100		170		96,9
6		10.2		51
3		5.1		35,7

Ava

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		377,4
300		510		270,3
200		340		229,5
100		170		183,6
6		10.2		96,9
3		5.1		91,8

Ava + 1

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		412,1
300		510		300,9
200		340		255
100		170		204
6		10.2		117,3
3		5.1		102

Ava + 2

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		448,8
300		510		331,5
200		340		285,6
100		170		229,5
6		10.2		132,6
3		5.1		117,3

Ava + 3

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		535,5
300		510		387,6
200		340		331,5
100		170		270,3
6		10.2		158,1
3		5.1		142,8

MI

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		219,3
300		510		137,7
200		340		112,2
100		170		76,5
6		10.2		40,8
3		5.1		35,7

MI + 1

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		249,9
300		510		163,2
200		340		132,6
100		170		91,8
6		10.2		51
3		5.1		45,9

MI + 2

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		295,8
300		510		198,9
200		340		163,2
100		170		122,4
6		10.2		71,4
3		5.1		66,3

MI + 3

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		336,6
300		510		229,5
200		340		193,8
100		170		147,9
6		10.2		91,8
3		5.1		86,7

basp

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		244,8
300		510		142,8
200		340		117,3
100		170		91,8
6		10.2		71,4
3		5.1		56,1

basp + 1

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		341,7
300		510		229,5
200		340		204
100		170		173,4
6		10.2		96,9
3		5.1		86,7

basp + 2

Lecture	tr/min	Vitesse de cisaillement	1/s	Contrainte de cisaillement Pa
600		1020		418,2
300		510		321,3
200		340		316,2
100		170		290,7
6		10.2		163,2
3		5.1		147,9

Variation de pression et des pertes de charges en fonction de la variation de debit :**AVA**

debit	m3/s	Pression	Pa	Pertes des charges	m
300		305		170,9	
600		319		173,1	
900		330		175,1	
1200		340		176,7	
1500		350		178,1	

AVA+1

debit	m3/s	Pression	Pa	Pertes des charges	m
300		344		193,1	
600		359		195,7	
900		372		197,7	
1200		383		199,5	
1500		393		201	

AVA+2

debit	m3/s	Pression	Pa	Pertes des charges	m
300		391		220,5	
600		408		223,4	
900		422		225,6	
1200		434		227,5	
1500		445		229,2	

AVA+3

debit	m3/s	Pression	Pa	Pertes des charges	m
300		453		255,1	
600		474		258,5	
900		490		261,1	
1200		504		263,4	
1500		517		265,4	

MI

debit	m3/s	Pression	Pa	Pertes des charges	m
300		111		60,2	
600		119		61,5	
900		125		62,4	
100		131		63,3	
1500		137		64	

MI+1

debit	m3/s	Pression	Pa	Pertes des charges	m
300		140		76,1	
600		149		77,6	
900		156		78,7	
1200		163		79,7	
1500		169		80,6	

MI+2

debit	m3/s	Pression	Pa	Pertes des charges	m
300		192		105,9	
600		203		107,7	
900		212		109,1	
1200		220		110,3	
1500		227		111,3	

MI+3

debit	m3/s	Pression	Pa	Pertes des charges	m
300		238		132,2	
600		250		134,2	
900		261		135,9	
1200		270		137,3	
1500		278		138,5	

Résultas du AR2000 :

MI

Contrainte de cisaillement Pa	Vitesse de cisaillement 1/s	Viscosité Pa.s	Temps s	Température °C
0,387	2,04	0,1897	1,024	50
0,4221	5,206	0,08108	2,016	50
0,5522	17,99	0,03069	6,02	50
0,9834	61,16	0,01608	19,02	50
1,021	64,35	0,01587	20,02	50
1,063	67,56	0,01574	21,02	50
1,636	128,4	0,01275	39,01	50
1,682	131,6	0,01279	40,02	50
1,696	134,8	0,01259	41,02	50
1,928	158,8	0,01214	48,02	50
2,181	187,6	0,01163	57,01	50
2,447	218	0,01123	66,01	50
2,741	251,6	0,0109	76,01	50
2,979	278,8	0,01069	84,01	50
3,156	298	0,01059	90,01	50
3,445	334,8	0,01029	101	50
3,735	368,4	0,01014	111	50
3,921	390,8	0,01003	118	50
4,103	411,6	9,97E-03	124	50
4,468	458	9,76E-03	138	50
4,731	488,3	9,69E-03	147	50
4,953	515,6	9,61E-03	155	50
5,125	531,6	9,64E-03	160	50
5,419	568,4	9,54E-03	171	50
5,75	608,4	9,45E-03	183	50
5,97	630,8	9,47E-03	190	50
6,119	648,3	9,44E-03	195	50
6,449	685,1	9,41E-03	206	50
6,75	722	9,35E-03	217	50
6,911	738	9,37E-03	222	50
7,126	758,7	9,39E-03	228	50
7,447	795,6	9,36E-03	239	50
7,722	835,6	9,24E-03	251	50
7,946	858	9,26E-03	258	50
8,135	878,8	9,26E-03	264	50
8,41	907,6	9,27E-03	273	50
8,714	941,1	9,26E-03	283	50
8,93	968,4	9,22E-03	291	50
9,091	987,5	9,21E-03	297	50
9,136	990,8	9,22E-03	298	50
9,185	995,5	9,23E-03	299	50
9,219	997,2	9,25E-03	299,7	50

MI +1

Contrainte de cisaillement Pa	Vitesse de cisaillement 1/s	Viscosité Pa.s	Temps s	Température °C
0,353	0,864	0,4085	1,016	50
0,6418	5,611	0,1144	2,036	50
0,7546	18,4	0,04101	6,028	50
0,9821	34,37	0,02857	11,03	50
1,164	48,8	0,02386	15,03	50
1,442	71,17	0,02026	22,03	50
1,753	98,38	0,01782	30,03	50
1,95	114,4	0,01705	35,03	50
2,157	135,2	0,01596	41,03	50
2,445	160,8	0,01521	49,03	50
2,718	188	0,01446	57,02	50
2,914	208,8	0,01396	63,01	50
3,17	234,4	0,01353	71,03	50
3,466	264,8	0,01309	80,03	50
3,72	288,8	0,01288	87,02	50
3,92	311,2	0,0126	94,01	50
4,175	338,4	0,01234	102	50
4,457	368,8	0,01209	111	50
4,723	397,6	0,01188	120	50
4,945	421,6	0,01173	127	50
5,161	440,8	0,01171	133	50
5,46	477,6	0,01143	144	50
5,73	504,8	0,01135	152	50
5,943	525,6	0,01131	158	50
6,175	548	0,01127	165	50
6,467	578,4	0,01118	174	50
6,748	608,8	0,01108	183	50
6,917	624,8	0,01107	188	50
7,191	648,8	0,01108	195	50
7,44	677,6	0,01098	204	50
7,737	711,2	0,01088	214	50
7,918	725,6	0,01091	218	50
8,142	748	0,01089	225	50
8,43	772	0,01092	232	50
8,705	804	0,01083	242	50
8,984	824,8	0,01089	248	50
9,205	845,6	0,01089	254	50
9,438	877,5	0,01075	264	50
9,725	904,8	0,01075	272	50
9,944	928,8	0,01071	279	50
10,11	948	0,01067	285	50
10,4	972	0,0107	292	50
10,56	988	0,01069	297	50
10,68	997,6	0,01071	299,6	50

Contrainte de cisaillement Pa	Vitesse de cisaillement 1/s	Viscosité Pa.s	Temps s	Température °C
0,5679	1,122	0,5061	1,02	50,1
0,7767	4,29	0,181	2,02	50,1
0,8719	15,48	0,05632	5,02	50,1
0,9564	21,87	0,04373	7,02	50,1
1,104	31,47	0,03509	10,02	50,1
1,401	52,26	0,02681	16,03	50,1
1,704	74,66	0,02282	23,02	50,1
1,931	92,25	0,02093	28,02	50,1
2,124	108,2	0,01963	33,04	50,1
2,42	132,3	0,0183	40,02	50,1
2,719	157,9	0,01723	48,02	50,1
2,942	178,6	0,01647	54,02	50
3,119	194,6	0,01602	59,02	50
3,435	225	0,01526	68,02	50
3,724	252,2	0,01476	76,02	50
3,917	271,5	0,01443	82,02	50
4,17	295,5	0,01411	89,02	50
4,43	321	0,0138	97,02	50
4,75	354,6	0,01339	107	50
4,91	370,7	0,01325	112	50
5,125	391,5	0,01309	118	50
5,41	421,8	0,01282	127	50
5,77	455,5	0,01267	137	50
5,912	474,6	0,01245	143	50
6,13	495,4	0,01237	149	50
6,451	524,2	0,01231	158	50
6,69	551,4	0,01213	166	50
6,97	578,7	0,01205	174	50
7,156	597,9	0,01197	180	50
7,451	625	0,01192	188	50
7,725	652,3	0,01184	196	50
7,95	674,6	0,01178	203	50
8,18	698,7	0,01171	210	50
8,419	724,3	0,01162	218	50
8,755	751,5	0,01165	226	50
8,99	775,5	0,01159	233	50
9,156	791,4	0,01157	238	50
9,424	818,7	0,01151	246	50
9,69	844,3	0,01148	254	50
9,946	871,4	0,01141	262	50
10,14	892,3	0,01137	268	50
10,4	917,9	0,01133	276	50
10,77	951,4	0,01132	286	50
10,96	972,2	0,01128	292	50
11,1	988,3	0,01123	297	50
11,17	991,4	0,01126	298	50
11,18	994,7	0,01124	299	50
11,18	996,2	0,01122	299,6	50

Annexe

Contrainte de cisaillement	Vitesse de cisaillement Pa	viscosité 1/s Pa.s	temps s	température °C
1,201	1,315	0,9134	1,02	50,1
1,455	10,88	0,1337	4,008	50,1
1,746	22,07	0,07913	7,008	50,1
1,986	31,66	0,06272	10,01	50,1
2,131	38,05	0,05601	12,02	50,1
2,445	50,85	0,04808	16,02	50,1
2,782	65,26	0,04263	20,01	50,1
2,98	74,84	0,03982	23,01	50,1
3,139	81,25	0,03863	25,01	50,1
3,503	98,85	0,03543	30,01	50,1
3,751	111,6	0,0336	34,01	50,1
3,952	121,3	0,0326	37,02	50,1
4,195	134	0,0313	41,01	50,1
4,468	148,4	0,0301	45,02	50,1
4,771	164,4	0,02901	50,01	50
4,966	174	0,02854	53,01	50
5,151	185,2	0,02781	56,01	50
5,425	201,3	0,02696	61,01	50
5,714	218,8	0,02611	66,02	50
5,945	231,7	0,02566	70,02	50
6,163	244,4	0,02521	74,01	50
6,401	262	0,02443	79,01	50
6,724	281,2	0,02391	85,01	50
6,939	294	0,0236	89,01	50
7,16	308,4	0,02321	93,01	50
7,458	327,7	0,02276	99,01	50
7,719	345,3	0,02236	104	50
7,969	361,3	0,02206	109	50
8,158	374	0,02181	113	50
8,432	391,6	0,02153	118	50
8,72	410,8	0,02122	124	50
8,92	425,2	0,02098	128	50
9,134	438	0,02085	132	50
9,424	454	0,02076	137	50
9,736	474,8	0,0205	143	50
9,965	490,9	0,0203	148	50
10,12	502	0,02015	151	50
10,46	521,2	0,02006	157	50
10,75	542,1	0,01983	163	50
10,95	554,8	0,01973	167	50
11,15	567,6	0,01964	171	50
11,42	585,2	0,01951	176	50
11,7	604,5	0,01935	182	50
11,92	618,9	0,01926	186	50
12,1	631,6	0,01916	190	50
12,42	650,9	0,01908	196	50
12,77	678	0,01884	204	50
12,96	687,6	0,01885	207	50
13,11	698,8	0,01875	210	50
13,48	724,4	0,01861	218	50
13,78	738,9	0,01865	222	50
13,9	748,4	0,01857	225	50

Annexe

14,14	761,2	0,01857	229	50
14,4	778,8	0,01849	234	50
14,7	798,1	0,01842	240	50
14,93	810,8	0,01841	244	50
15,13	828,4	0,01827	249	50
15,47	850,8	0,01818	256	50
15,75	865,3	0,01821	260	50
15,92	878	0,01814	264	50
16,14	890,9	0,01812	268	50
16,41	911,6	0,018	274	50
16,77	934	0,01795	281	50
16,95	948,4	0,01787	285	50
17,1	954,8	0,01791	287	50
17,48	982,1	0,0178	295	50
17,74	996,5	0,0178	299,6	50

MI+4

Contrainte de cisaillement	Vitesse de cisaillement Pa	viscosité Pa.s	temps s	température °C
40,23	1,714	23,46	1,008	50,1
40,75	4,902	8,313	2,012	50,1
41,1	8,107	5,07	3,008	50,1
46,02	20,9	2,202	7,012	50,1
54,1	44,89	1,205	14,01	50,1
55,07	48,11	1,145	15,02	50,1
67,45	100,9	0,6686	31,01	50,1
68,34	105,7	0,6466	32,02	50,1
68,95	108,9	0,6332	33,01	50,1
69,56	112,1	0,6206	34,02	50,1
70,15	115,3	0,6084	35,01	50,1
70,7	118,5	0,5967	36,01	50,1
71,27	121,7	0,5857	37,01	50,1
74,57	140,9	0,5293	43,01	50,1
75,07	145,7	0,5152	44,01	50,1
75,86	148,9	0,5095	45,02	50,1
84,31	204,9	0,4115	62,01	50
84,76	208,1	0,4073	63,02	50
85,18	211,3	0,4032	64,01	50
85,62	214,5	0,3992	65,01	50
86,05	217,7	0,3953	66,02	50,1
86,49	220,9	0,3916	67,02	50
86,92	224,1	0,3879	68,01	50
87,57	228,9	0,3826	69,01	50
88	232,1	0,3792	70,01	50
90,13	248,1	0,3633	75,02	50
99,19	318,5	0,3115	96,03	50
99,59	321,7	0,3096	97,02	50
99,96	324,9	0,3077	98,02	50
100,4	328	0,3061	99,01	50
100,7	331,3	0,3041	100	50
101,2	334,5	0,3024	101	50
101,5	337,7	0,3007	102	50
101,9	340,9	0,299	103	50

Annexe

116,5	464,1	0,2509	140	50
117	468,9	0,2495	141	50
117,4	472,1	0,2487	142	50
117,8	475,3	0,2478	143	50
118,1	478,5	0,2469	144	50
135,4	624,1	0,217	188	50
137,6	641,7	0,2144	193	50
138	644,9	0,2139	194	50
138,3	648,1	0,2135	195	50
138,7	651,3	0,213	196	50
139,1	654,5	0,2125	197	50
139,5	657,7	0,2121	198	50
139,9	660,9	0,2117	199	50
140,3	664,1	0,2112	200	50
140,9	668,9	0,2106	201	50
156,3	795,3	0,1965	239	50
156,7	798,5	0,1962	240	50
157	801,7	0,1958	241	50
157,4	804,9	0,1956	242	50
157,8	808,1	0,1953	243	50
167	884,9	0,1887	266	50
167,4	888,1	0,1885	267	50
167,8	891,3	0,1882	268	50
169,3	904,1	0,1872	272	50
169,9	908,9	0,1869	273	50
170,2	912,1	0,1867	274	50
170,6	915,3	0,1864	275	50
171	918,5	0,1862	276	50
171,4	921,7	0,1859	277	50
178,1	977,7	0,1821	294	50
179,4	988,9	0,1814	297	50
179,8	992,1	0,1812	298	50
180,2	995,3	0,181	299	50
180,3	996,9	0,1809	299,7	50

MI+5

Contrainte de cisaillement	Vitesse de cisaillement Pa	viscosité 1/s Pa.s	temps s	température °C
96,74	1,687	57,35	1,012	50,1
108,1	4,912	22,01	2,024	50,1
109,1	8,102	13,47	3,028	50,1
111,8	11,3	9,894	4,024	50,1
115,1	14,5	7,937	5,028	50,1
118,1	17,68	6,679	6,028	50,1
133,1	35,3	3,772	11,02	50,1
135,6	38,5	3,522	12,02	50,1
137,5	41,69	3,298	13,03	50,1
139,9	44,88	3,118	14,03	50,1
141,7	48,08	2,947	15,01	50,1
144,1	51,29	2,809	16,01	50,1
145,6	54,49	2,673	17,01	50,1
147,8	57,69	2,562	18,02	50,1
149,5	60,89	2,455	19,03	50,1

Annexe

152,1	65,67	2,317	20,02	50,1
153,1	67,3	2,275	21,01	50,1
155,6	72,09	2,158	22,01	50,1
157,3	75,28	2,089	23,01	50,1
158,8	78,49	2,023	24,01	50,1
160,4	81,68	1,964	25,01	50,1
166,5	94,48	1,762	29,02	50,1
167,9	97,69	1,718	30,01	50,1
169,2	100,9	1,677	31,02	50,1
171,6	105,7	1,623	32,02	50,1
172,8	108,9	1,587	33,03	50,1
174	112,1	1,552	34,02	50,1
212,5	214,5	0,9907	65,02	50
213,6	217,7	0,9816	66,01	50
214,7	220,9	0,972	67,02	50
216,4	225,7	0,959	68,03	50
217,4	228,9	0,9498	69,03	50,1
218,5	232,1	0,9415	70,02	50
219,6	235,3	0,9334	71,02	50
220,7	238,5	0,9255	72,02	50
221,8	241,7	0,9179	73,02	50
222,9	244,9	0,9103	74,03	50
256,5	344,1	0,7456	104	50
258,1	348,9	0,7398	105	50
259,2	352,1	0,7361	106	50
260,2	355,3	0,7324	107	50
261,2	358,5	0,7287	108	50
262,2	361,7	0,725	109	50
263,3	364,9	0,7216	110	50
264,3	368,1	0,7182	111	50
265,4	371,3	0,7148	112	50
290,8	448,1	0,649	135	50
325,2	548,9	0,5925	165	50
326,3	552,1	0,591	166	50
348,8	617,7	0,5647	186	50
350	620,9	0,5637	187	50
351	624,1	0,5623	188	50
382,2	718,5	0,532	216	50
382,9	721,7	0,5306	217	50
384	724,9	0,5298	218	50
385,1	728,1	0,5289	219	50
401,6	771,3	0,5207	232	50
402,5	774,5	0,5196	233	50
403,5	777,7	0,5189	234	50
404,5	780,9	0,5181	235	50
410,5	801,7	0,5121	241	50
411,7	804,9	0,5115	242	50
412,7	808,1	0,5107	243	50
414	811,3	0,5102	244	50
415	814,5	0,5095	245	50
416,2	817,7	0,5089	246	50
417	820,9	0,508	247	50
418,5	825,7	0,5068	248	50
419,5	828,9	0,5062	249	50
464,5	968,1	0,4798	291	50

Annexe

465,6	971,3	0,4793	292	50
473,7	995,3	0,4759	299	50
474,1	996,9	0,4756	299,7	50

basp

Contrainte de cisaillement Pa	Vitesse de cisaillement 1/s	viscosité Pa.s	temps s	température °C
2,174	2,348	0,9259	1,028	50,1
2,378	5,522	0,4305	2,036	50,1
2,689	11,91	0,2257	4,024	50,1
2,982	18,31	0,1628	6,036	50,1
3,128	21,51	0,1455	7,036	50,1
3,504	31,1	0,1127	10,04	50,1
3,746	37,5	0,09988	12,04	50,1
3,912	42,29	0,0925	13,04	50,1
4,122	48,7	0,08464	15,02	50,1
4,427	58,3	0,07594	18,04	50,1
7,415	171,9	0,04314	52,04	50,1
7,731	184,7	0,04186	56,04	50,1
10,15	298,3	0,03402	90,02	50
10,41	311,1	0,03347	94,03	50
10,7	325,5	0,03287	98,04	50
10,96	338,3	0,0324	102	50
11,15	347,9	0,03206	105	50
11,45	362,3	0,03161	109	50
11,71	375,1	0,03122	113	50
14,94	541,5	0,02759	163	50
15,18	554,3	0,02738	167	50
15,44	568,7	0,02715	171	50
15,73	584,7	0,02691	176	50
15,98	597,5	0,02675	180	50
16,16	608,7	0,02656	183	50
16,42	621,5	0,02642	187	50
16,71	637,5	0,02621	192	50
18,71	738,3	0,02534	222	50
18,97	751,1	0,02526	226	50
19,2	762,3	0,02519	229	50
19,4	771,9	0,02513	232	50
19,75	791,1	0,02496	238	50
19,91	802,3	0,02481	241	50
20,1	811,9	0,02476	244	50
20,4	824,7	0,02474	248	50
20,71	842,3	0,02458	253	50
20,98	858,3	0,02445	258	50
21,14	864,7	0,02444	260	50
21,5	882,3	0,02437	265	50
21,76	898,3	0,02423	270	50
21,98	911	0,02413	274	50
22,25	922,3	0,02413	277	50
22,4	931,9	0,02404	280	50
22,7	944,7	0,02403	284	50
22,92	954,3	0,02402	287	50
23,18	968,7	0,02393	291	50

Annexe

23,43	981,5	0,02387	295	50
23,73	994,3	0,02386	299	50
23,71	997,5	0,02376	299,7	50

basp +1

Contrainte de cisaillement	Vitesse de cisaillement Pa	viscosité Pa.s	temps s	température °C
15,04	1,902	7,907	1,016	50,1
17,25	5,094	3,387	2,032	50,1
18,21	8,279	2,2	3,032	50,1
19,05	11,45	1,664	4,032	50,1
19,78	14,69	1,346	5,032	50,1
20,39	17,89	1,14	6,032	50,1
20,91	21,08	0,992	7,032	50,1
21,42	24,28	0,882	8,032	50,1
26,83	78,68	0,341	24,03	50,1
27,06	81,86	0,3306	25,04	50,1
27,29	85,06	0,3209	26,03	50,1
27,53	88,27	0,3118	27,04	50,1
27,77	91,46	0,3036	28,03	50,1
28	94,67	0,2957	29,03	50,1
28,23	97,86	0,2884	30,02	50,1
28,45	101,1	0,2815	31,02	50,1
29,86	121,8	0,2451	37,03	50,1
30,06	125,1	0,2403	38,03	50,1
30,27	128,3	0,236	39,03	50,1
30,46	131,5	0,2317	40,03	50,1
30,65	134,7	0,2276	41,03	50,1
33,03	174,7	0,1891	53,03	50,1
33,2	177,9	0,1867	54,03	50,1
36,06	232,3	0,1552	70,03	50
36,23	235,5	0,1539	71,03	50
36,38	238,7	0,1524	72,03	50
39,33	297,9	0,1321	90,01	50
39,5	301,1	0,1312	91,01	50
39,64	304,3	0,1303	92,01	50
39,78	307,5	0,1294	93,03	50
40	312,3	0,1281	94,03	50
40,14	315,5	0,1272	95,03	50
40,29	318,7	0,1264	96,03	50
40,42	321,9	0,1256	97,04	50
40,55	325,1	0,1247	98,03	50
40,7	328,2	0,124	99,02	50
40,84	331,5	0,1232	100	50
47,05	485,1	0,09699	146	50
49,76	555,4	0,08959	167	50
49,9	558,7	0,08931	168	50
50,02	561,9	0,08903	169	50
50,14	565,1	0,08873	170	50
50,26	568,3	0,08844	171	50
51,12	592,3	0,08631	178	50
58,33	801,9	0,07274	241	50
58,47	805	0,07263	242	50

Annexe

61,86	907,5	0,06816	273	50
61,96	912,2	0,06792	274	50
62,71	934,7	0,06709	281	50
63,9	974,7	0,06556	293	50
64,02	977,8	0,06547	294	50
64,08	981,1	0,06531	295	50
64,18	984,2	0,06521	296	50
64,29	987,5	0,06511	297	50
64,45	992,3	0,06495	298	50
64,58	995,5	0,06487	299	50
64,55	997,1	0,06474	299,7	50

bas+2

Contrainte de cisaillement	Vitesse de cisaillement Pa	viscosité Pa.s	temps s	température °C
21,11	1,153	18,31	1,012	50,1
33,85	4,366	7,754	2,04	50,1
36,03	7,56	4,765	3,036	50,1
38,61	12,35	3,127	4,032	50,1
40,04	15,56	2,574	5,036	50,1
41,21	18,75	2,198	6,032	50,1
55,02	84,35	0,6522	26,03	50,1
55,49	87,55	0,6339	27,04	50,1
59,19	114,7	0,5159	35,02	50,1
59,57	117,9	0,5051	36,03	50,1
59,99	121,1	0,4952	37,03	50,1
60,43	124,3	0,4861	38,03	50,1
60,79	127,5	0,4766	39,03	50,1
61,42	132,3	0,4641	40,03	50,1
65,08	164,3	0,396	50,03	50,1
65,4	167,5	0,3903	51,03	50,1
65,85	172,3	0,3822	52,03	50,1
66,21	175,5	0,3772	53,03	50,1
69	204,3	0,3377	62,03	50
69,29	207,5	0,3339	63,03	50
69,74	212,3	0,3284	64,04	50
70,01	215,5	0,3248	65,03	50,1
70,31	218,7	0,3214	66,05	50
70,62	221,9	0,3182	67,04	50
70,89	225,1	0,3149	68,03	50
71,19	228,3	0,3118	69,03	50
71,49	231,5	0,3087	70,03	50,1
74,89	271,5	0,2758	82,03	50
77,05	298,7	0,2579	90,01	50
80,09	335,5	0,2387	101	50
80,34	338,7	0,2372	102	50
80,6	341,9	0,2357	103	50
80,85	345,1	0,2343	104	50
81,08	348,3	0,2328	105	50
84,1	388,3	0,2166	117	50
86,76	425,1	0,2041	128	50
87	428,3	0,2031	129	50
87,2	431,5	0,2021	130	50

Annexe

89,91	471,5	0,1907	142	50
90,16	474,7	0,1899	143	50
90,35	477,9	0,189	144	50
94,17	538,7	0,1748	162	50
94,38	541,9	0,1741	163	50
97,83	594,7	0,1645	179	50
98,05	597,9	0,164	180	50
99,83	628,3	0,1589	189	50
100	631,5	0,1584	190	50
102	665,1	0,1533	200	50
102,1	668,3	0,1528	201	50
103,9	698,7	0,1488	210	50
104,2	701,9	0,1484	211	50
105,2	721,1	0,1459	217	50
107	751,5	0,1424	226	50
108,5	778,7	0,1394	234	50
108,7	781,9	0,139	235	50
108,8	785,2	0,1386	236	50
109	788,3	0,1383	237	50
112,5	852,3	0,132	256	50
113	861,9	0,1311	259	50
114,2	884,3	0,1291	266	50
115,5	908,3	0,1272	273	50
115,6	911,5	0,1268	274	50
115,8	914,8	0,1266	275	50
116	917,9	0,1264	276	50
117	938,7	0,1247	282	50
118,6	964,4	0,123	290	50
119,8	985,1	0,1216	296	50
119,9	988,4	0,1213	297	50
120,1	991,5	0,1211	298	50
120,2	994,7	0,1209	299	50
120,3	996,4	0,1208	299,6	50

basp+3

Contrainte de cisaillement Pa	Vitesse de cisaillement 1/s	viscosité Pa.s	Temps s	température °C	
40,5	0,9989		40,55	1,02	50,1
70,33	4,224		16,65	2,036	50,1
77,39	9,036		8,564	3,024	50,1
81,17	12,23		6,637	4,016	50,1
89,15	21,79		4,092	7,016	50,1
91,36	25,02		3,651	8,024	50,1
93,51	28,23		3,313	9,016	50,1
95,42	31,43		3,037	10,02	50,1
97,16	34,63		2,805	11,02	50,1
99,06	37,82		2,619	12,02	50,1
100,7	41,02		2,455	13,02	50,1
102,4	44,23		2,316	14,02	50,1
115,1	74,62		1,543	23,02	50,1
116,2	77,81		1,493	24,02	50,1
117,4	81		1,449	25,03	50,1
118,5	84,2		1,407	26,02	50,1
120,1	89,01		1,35	27,02	50,1

Annexe

121,1	92,21	1,314	28,02	50,1
137,3	148,2	0,9266	45,03	50,1
138,2	151,4	0,9126	46,02	50,1
139	154,6	0,8988	47,02	50,1
147,8	194,6	0,7593	59,02	50,1
148,5	197,8	0,7507	60,02	50,1
149,2	201	0,742	61,02	50
149,8	204,2	0,7336	62,02	50
150,5	207,4	0,7255	63,02	50
151,4	212,2	0,7136	64,02	50
159	247,4	0,6425	75,01	50
177,3	348,2	0,5093	105	50
178,1	351,4	0,5067	106	50
178,6	354,6	0,5037	107	50
179,1	357,8	0,5006	108	50
179,6	361	0,4976	109	50
180,2	364,2	0,4946	110	50
180,9	369	0,4902	111	50
181,4	372,2	0,4873	112	50
181,9	375,4	0,4846	113	50
182,4	378,6	0,4817	114	50
182,9	381,8	0,479	115	50
188,8	418,6	0,4511	126	50
189,3	421,8	0,4487	127	50
189,6	425	0,4462	128	50
190,1	428,2	0,444	129	50
205,8	524,2	0,3926	158	50
206,5	529	0,3903	159	50
207	532,2	0,3889	160	50
207,4	535,4	0,3873	161	50
207,8	538,6	0,3858	162	50
208,3	541,8	0,3845	163	50
208,7	545	0,383	164	50
209,2	548,2	0,3815	165	50
209,6	551,4	0,3802	166	50
217,2	604,2	0,3595	182	50
217,6	607,4	0,3582	183	50
218,1	612,2	0,3563	184	50
218,5	615,4	0,355	185	50
218,9	618,6	0,3539	186	50
219,3	621,8	0,3526	187	50
219,7	625	0,3515	188	50
246,7	825	0,299	248	50
252,9	874,6	0,2892	263	50
253,3	877,8	0,2885	264	50
253,6	881	0,2879	265	50
263,8	961	0,2745	289	50
264,2	964,2	0,274	290	50
264,5	967,4	0,2734	291	50
265,1	972,2	0,2727	292	50
267,6	991,4	0,2699	298	50
267,9	994,6	0,2694	299	50
268,2	996,2	0,2692	299,6	50

Classification des fluides non Newtoniens

