

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Génie des procédés

Thèse de doctorat

Présentée par

HAIDER Soumia

En vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT SCIENCES en :

Filière : Sciences et Génie des Matériaux

Option : Physico-chimie des matériaux

THEME

Valorisation des déchets de bois dans la formulation des fluides de forage à base d'eau

Devant le jury :

BENMOUNAH Abdelbaki	Pr.	UMBB	Président
KHERIBET Rabia	Pr.	UMBB	Examineur
HADJADJ Ahmed	Pr.	Univ. Adrar	Examineur
SAFI Brahim	Pr.	UMBB	Directeur de Thèse
BENSLIMANE Abdelhakim	MCA	Univ. Béjaia	Examineur
HAMMADI Larbi	MCA	UST-Oran	Co-directeur de Thèse

Année Universitaire 2020 – 2021

ملخص

حاليًا في مجال حفر آبار النفط ، يميل البحث إلى استخدام أو إعادة تدوير النفايات الصناعية التي تكون فعالة في تقليل تكلفة عملية الحفر. في ضوء القيود البيئية التي تلزمنا على البحث عن مكونات بديلة لسوائل الحفر التي يمكن أن تحل محل البوليمرات دون الإخلال بالخصائص الريولوجية لهذه السوائل. من بين النفايات الصناعية التي يمكن استخدامها في سوائل الحفر ، بقايا الخشب. للخشب خصائص هيكلية مميزة وهي وجود التجويف الطولي الذي له أهمية في معالجة مياه الصرف الصحي ، من خلال تثبيت العديد من العناصر غير المرغوب فيها على جدران المادة. لذلك ، يجب دراسة استعادة مسحوق الخشب واستخدامه كمكونات في سوائل الحفر. لهذا ، ستركز دراستنا على استخدام مسحوق الخشب عن طريق استبدال البوليمر في سوائل الحفر القائم على الماء. تم تصميم سائل حفر مائي منخفض التكلفة وصديق للبيئة باستخدام نفايات الخشب لتحل محل البوليمرات العضوية التي غالبًا ما تزيد من تكلفة عملية الحفر. يتمتع طين الحفر الذي تم تطويره بخصائص ريولوجية أفضل وبالتحكم في فقد السوائل اللازمة للتشغيل السليم لحفر آبار النفط. من خلال الاستبدال الكلي للبوليمرات (CMC أو PAC) يمكننا استخدام مسحوق الخشب (300 ميكرومتر بتركيز 850 كجم / م³ كمخفض ترشيح) ، مع الحصول على المرشح بحد أدنى وقيم مطلوبة للتكوين عند الحفر كلمات مفتاحية : حفر آبار, النفايات الصناعية, البوليمرات, سوائل الحفر, الريولوجية

Résumé

Actuellement dans le domaine du forage des puits du pétrole, la recherche a la tendance à utiliser ou valoriser certains déchets industriels efficaces pour réduire au minimum le coût de l'opération de forage. Vue les contraintes environnementales qui nous obligent à rechercher des constituants alternatifs pour les fluides de forage qui peuvent remplacer les polymères sans perturber les caractéristiques rhéologiques des fluides de forage. Parmi les déchets qui peuvent être utilisés dans des fluides de forage, est que les déchets de bois. Les propriétés structurales du bois et de la présence de la cavité longitudinale présentent un intérêt dans le traitement des eaux usées, par la fixation de divers éléments indésirables sur les parois du matériau. Cependant, la récupération et l'utilisation de la poudre de bois en tant que constituants dans les fluides de forage, nécessite d'être étudié. Pour cela, notre étude se concentrera sur l'utilisation de la poudre de bois par substitution de polymère dans la boue de forage à base d'eau. Une boue de forage à base d'eau écologique et à faible coût a été conçu en utilisant des déchets de bois afin de remplacer les polymères organiques qui font souvent augmenter le prix de revient d'une opération de forage.

La boue de forage qui a été développé, a de meilleures propriétés rhéologiques et le contrôle de perte de fluide qui sont nécessaires pour un bon fonctionnement du forage de puits de pétrole. Par substitution totale de polymères (cas : CMC ou PAC), on peut utiliser la poudre de bois (300 µm jusqu'à 850 Kg/m³ comme réducteur de filtrat), avec le filtrat obtenu présente un minimum et ayant des valeurs demandées pour la formation à forer

Mots clés : forage, déchets industriels, polymères, fluides de forage, rhéologiques.

Abstract

Currently in the field of drilling oil wells, research tends to use or recover certain industrial wastes that are effective in minimizing the cost of the drilling operation. In view of the environmental constraints which oblige us to search for alternative constituents for drilling fluids which can replace polymers without disturbing the rheological characteristics of drilling fluids. Among the wastes that can be used in drilling fluids, is that wood waste. The structural properties of wood and the presence of the longitudinal cavity are of interest in the treatment of wastewater, by fixing various undesirable elements on the walls of the material. However, the recovery and use of wood powder as constituents in drilling fluids needs to be studied. For this, our study will focus on the use of wood powder by polymer substitution in water-based drilling mud. A low-cost, environmentally friendly water-based drilling mud was designed using waste wood to replace organic polymers that often increase the cost of a drilling operation.

The drilling mud that has been developed, has better rheological properties and fluid loss control which are necessary for proper operation of oil well drilling. By total substitution of polymers (case: CMC or PAC), we can use wood powder (300µm up to 850Kg / m³ as filtrate reducer), with the filtrate obtained having a minimum and having values requested for the formation at drill

Keywords : industrial wastes, polymers, drilling fluids, rheological.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le bon DIEU qui m'a donné la volonté et le courage afin de réaliser ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur SAFI Brahim, Professeur à l'Université M'Hamed Bougara Boumerdes (UMBB), Faculté de Technologie (FT) qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente, pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués, et surtout pour sa patience. Ainsi que Mr HAMMADI Larbi mon co-directeur.

J'exprime ma gratitude à Mr BENMOUNAH Abdelbaki, Professeur à l'Université M'Hamed Bougara Boumerdes (UMBB) d'avoir accepté de présider le jury, à Mr KHERIBET Rabia, Professeur à l'UMBB, Mr HADJADJ Ahmed Professeur à l'Université d'Adrar, et Mr BENSLIMANE Abdelhakim, qui ont bien voulu être examinateurs.

Je tiens aussi à remercier Monsieur SADDIK Adel, Directeur de Baroid Algeria de Services aux Puits (BASP) et Monsieur OUDJEDI Lakhdar, qui m'ont accueilli pendant la durée de mon stage au sein de leur laboratoire, ainsi que toute l'équipe. C'est grâce à eux que j'ai pu concilier avec bonheur la recherche appliquée pendant cette thèse.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à toute ma famille,
ma belle-famille, surtout mon mari qui m'a
toujours soutenu, mes deux petites princesses et
mon petit prince.*

Sommaire

Introduction Générale.....	01
Chapitre I : Fluides De Forage	
1 – Introduction.....	04
2 - Définition d'un fluide de forage de type boue.....	05
3 - Fonctions.....	05
4- Caractéristiques des boues de forage	06
4-1- Densité	07
4-1-1- Rôle de la densité.....	07
A) Un accroissement en cours de forage est l'indice.....	07
B) Une diminution en cours de forage est l'indice.....	07
4.1.2- Matériel de contrôle	07
4-2- La rhéologie	08
4-2-1 - Rhéologie des fluides de forage.....	09
4-2-2- Grandeurs étudiées en rhéologie	10
4-2-2-1- Contrainte de cisaillement	10
4-2-2-2- Déformation de cisaillement	11
4-2-2-3- Gradient de vitesse	12
4-2-2-4- Viscosité.....	12
➤ Viscosité apparente	13
➤ Viscosité cinématique	14
4-2-3- Différents comportements rhéologiques.....	14
4-2-3-1- Fluides newtoniens	15
4-2-3-2- Les fluides non newtoniens indépendants de temps	15
a- Les fluides sans contrainte seuil.....	16
b- Les fluides à contrainte seuil.....	16
4-2-3-3- Les fluides non newtoniens dépendants du temps	17
a- Fluides thixotropes	17

b- Fluide anti-thixotrope	17
4-2-4- Modèles rhéologiques.....	17
4-2-4-1- Le modèle newtonien.....	19
4-2-4-2- Modèle d'Ostwald de Waele	19
4-2-4-3- Modèle de Cross.....	20
4-2-4-4- Le modèle Bingham	20
4-2-4-5- Le modèle de Herschel Bulkley.	21
4-2-4-6- Model de Casson	21
4-3- Filtration	22
4-3-1- Rôle de la filtration	23
4-3-1-1- Vitesse d'avancement du forage	23
4-3-1-2- Tenue des terrains	24
4-3-2- Matériel de contrôle.....	24
4-4- Emulsions	25
4-4-1- Principe et rôle des émulsions	25
4-4.1.1- Boues à émulsion directe bed	25
4.4.1.2- Boue à émulsion inverse.....	26
4.4.2- Matériel de contrôle	26
5 - Composition des différents types.....	28
5.1 Les fluides à base d'eau.....	29
5.2 Les fluides à base d'huile.....	30
5.3 Les fluides de forage gazeux.....	30
6 - Circuits de fluides de forage	32
6-1- Circulation normale	32
6-2- Circulation inverse	32
7 - Recommandations pour l'utilisation des fluides de forage.....	32
Chapitre II : Le Bois	
1- Introduction	35
2- Le bois	35
1. Constitution chimique.....	37
2.1. La lignine.....	38

2.2. La cellulose.....	41
2.3. Les hémicelluloses.....	42
2.4. Les extractibles.....	43
2.5. Les inertes.....	43
Chapitre III : Utilisation des déchets de bois du Pin d'Alep dans les boues de forage	
1- Caractérisations des matériaux.....	45
1-1-Introduction.....	45
1-2-La boue de forage utilisée.....	45
1-3-La poudre de bois utilisée.....	46
1-4-Méthodes d'essai.....	48
2- Résultats et discussions	48
2-1-Partie I : Utilisation de déchets de bois en tant que viscosifiant : Substitution de PAC et CMC par poudre de bois (Pin d'Alep)	48
2-1-1- Comportement rhéologique.....	48
2-2-Partie II : Utilisation de déchets de bois en tant qu'agent réducteur de filtrat : Substitution XCD et PAC_R par poudre de bois (Pin d'Alep)	54
2-2-1- Comportement rhéologique.....	54
Chapitre IV : Utilisation des déchets de bois d'une boiserie dans les boues de forage	
1- Introduction.....	63
2- La boue de forage utilisée.....	63
3- Méthodes d'essai.....	64
4- Caractérisation des matériaux.....	64
4-1-La bentonite.....	64
4-1-a- Composition chimique.....	64
4-2-Le Barazan.....	64
4-2-a- Applications.....	64
4-2-b- Avantages.....	65
4-3-Le PAC.....	65
4-3-a- Applications	65
4-3-b- Avantages.....	65
4-4-Dextrid.....	66

4-4-a- Applications.....	66
4-4-b- Avantages.....	66
4-5-BAROID	66
4-5-a- Applications.....	66
4-5-b- Avantages.....	66
5- La poudre de bois utilisée.....	67
5-1-L'analyses par microscope optique à donner les photos suivantes.....	69
6- Partie I : Utilisation de la poudre de bois en tant que viscosifiant ou réducteur de filtrat par substitution de PAC-L ou le Barazan par la poudre de bois.....	72
6-1-Avant Hot Rolling.....	72
6-2-Après Hot Rolling.....	79
7- Partie II : Utilisation de la poudre de bois en tant que viscosifiant et réducteur de filtrat par substitution totale des polymères synthétiques par la poudre de bois.....	81
7-1-Avant Hot Rolling.....	81
7-2-Après le Hot Rolling.....	85
8- Comparaison économique.....	89
Conclusion Générale	90
Perspectives.....	93

Liste des figures

Figure -1- : Ensemble des engins et dispositifs du forage.	04
Figure -2- : Densimètre pressurisé.....	07
Figure -3- : Densimètre Classique.	07
Figure -4- : Paliers de contraintes décroissants sur une boue de forage à l'huile, rupture de pente et thermo-dépendance.	09
Figure -5- : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.....	10
Figure -6- : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.	11
Figure -7- : Représentation d'un écoulement d'un fluide entre deux plaques l'une mobile et l'autre fixe.	13
Figure -8- : Courbes d'écoulement des principaux comportements rhéologique.....	15
Figure -9- : rhéogramme enregistré par un rhéomètre à contrainte imposée, (à gauche). Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à vitesse de cisaillement imposée, (à droite).	18
Figure -10- : Viscosimètre Marsh.	22
Figure -11- : Viscosimètre Fann.	22
Figure -12- : Filtre-presse API, Filtre-presse haute pression et haute température.....	25
Figure -13- : Testeur d'émulsion.	27
Figure -14- : Éléments du plan ligneux des bois résineux.....	36
Figure -15- : Schéma général des constituants chimiques du bois.....	37
Figure -16- : Alcools précurseurs de la lignine.....	39
Figure -17- : Structure de la lignine proposée.....	40
Figure -18- : Structure de la lignine issue d'un fragment.....	40
Figure -19- : Structure de la molécule de cellulose.	41
Figure -20- : Structure chimique partielle d'un O-acétyl-galacto-glucomannane chez les conifères.....	42
Figure -21- : Structure chimique partielle d'un O-acétyl-4-O-méthyl-gluco-ronoxylane chez les feuillus.....	42
Figure -22- : Types de liaisons possibles entre lignine et polysaccharides.....	43

Figure -23- : Poudre de bois utilisée (déchets de pin d'Alep) (a) SEM (b) XRD.....	47
Figure -24- : PAC_ul et CMC remplacés par la poudre de bois (PBde taille = 100 µm) à différentes concentrations	49
Figure -25- : PAC_ul et CMC remplacés par la poudre de bois (PB de taille = 200 µm) à différentes concentrations.....	50
Figure -26- : PAC_ul et CMC remplacés par la poudre de bois (PB de taille = 300 µm) à différentes concentrations.....	51
Figure -27- : substitution du PAC_ul et CMC par la poudre de bois.	53
Figure -28- : XCD et PAC_R remplacés par de la poudre de bois (WP de taille = 100µm) à un contenu différent.....	55
Figure -29- : XCD et PAC_R remplacés par de la poudre de bois (WP de taille = 200µm) à un contenu différent.....	56
Figure -30- : XCD et PAC_R remplacés par de la poudre de bois (PB de taille = 300µm) à un contenu différent.....	57
Figure -31- : substitution de XCD et PAC_R par la poudre de bois.....	59
Figure -32- : substitution de XCD et PAC_R par la poudre de bois.....	60
Figure -33- : le filtrat Api en fonction de différente boues à différentes concentration et taille de particules de la poudre de bois.....	61
Figure -34- : Distribution granulométrique par granulomètre Laser du bois.....	68
Figure -35- : Images obtenues par microscope optique de poudre de bois.....	70
Figure -36- : Dispositif de formulation des boues.....	70
Figure -37- : Dispositif de mesure du Filtrat API.....	71
Figure -38- : Appareil de mesure de la viscosité plastique.....	71
Figure -39- : Variation du yield point en fonction de la concentration de poudre de bois ajoutée à 160 µm en substituant du Pac-L et Barazan avant le Hot Rolling.....	73
Figure -40- : Variation du yield point en fonction de la concentration de poudre de boisajoutée à 315 µm en substituant du Pac-L et Barazan avant le Hot Rolling.....	74
Figure -41- : Variation du yield point en fonction de la concentration de poudre de bois ajoutée à 630 µm en substituant du Pac-L et Barazan avant le Hot Rolling.....	75

Figure -42- : Variation de la viscosité plastique en fonction de la concentration de poudre de bois ajoutée à différentes dimensions en substituant du Pac-L et Barazan avant le Hot Rolling.....	76
Figure -43- : Filtrat API acceptable.....	77
Figure -44- : Filtrat API incontrôlable.....	77
Figure -45- : Appareillage du test Hot Rolling.....	79
Figure -46- : Variation du yeild point en fonction de la concentration de la poudre de bois avant le Hot Rolling.....	82
Figure -47- : Variation de la viscosité plastique en fonction de la concentration de la poudre de bois avant le Hot Rolling.....	83
Figure -48- : Variation du yield point en fonction de la concentration de la poudre de bois après le Hot Rolling	86
Figure -49- : Variation de la viscosité plastique en fonction de la concentration de la poudre de bois après le Hot Rolling	87

Liste des tableaux

Tableau-1- : Principaux produits entrant dans la formulation d'une boue de forage à l'huile et leur rôle respectif.	28
Tableau -2- : Principaux additifs d'un fluide de forage.	29
Tableau -3- : Les principales caractéristiques des boues de forage.	34
Tableau -4- : Composition chimique de différents bois.	38
Tableau -5- : Composition des cendres (% massique).	44
Tableau -6- : Formulation de boue pour une densité $d = 1,05$	45
Tableau -7- caractérisation de boue à base d'eau formulée.	46
Tableau -8- : Formulation de boue avec le Barazan pour une densité $d = 1,20$	63
Tableau -9- : Formulation de boue avec le Pac-L pour une densité $d = 1,20$	63
Tableau 10 : Caractéristiques de la bentonite.	64
Tableau 11 : composition chimique de la bentonite.	64
Tableau 12 : propriétés physiques des polymères utilisés dans la formulation des boues.	67
Tableau 13 : Les surfaces spécifications de la poudre de bois.	69
Tableau -10- : Substitution de Pac-L ou du Barazan par la poudre de bois (Avant Hot Rolling).	72
Tableau -11- : Après Hot Rolling.	80
Tableau -12- : Substitution de Pac-L et du Barazan par la poudre de bois (Avant Hot Rolling).	81
Tableau -13- : Après le Hot Rolling.	85
Tableau -14- : Comparaison économique.	89

Introduction

Générale

La boue de forage est un mélange plus ou moins complexe basé le plus souvent sur une suspension colloïdale à base d'eau ou d'huile, utilisée pour le forage des puits. Cette boue, injectée dans le train de tiges de forage, circule par un mouvement ascendant dans l'espace annulaire compris entre les parois des formations géologiques forées et le train de tiges. Ses fonctions sont multiples : outre refroidir et lubrifier sans corroder l'outil de forage, la boue doit pouvoir remonter à la surface les débris arrachés aux formations. Il faut pour cela que la boue soit suffisamment visqueuse et que sa portance soit telle que les débris puissent tenir en suspension dans la boue quand le débit de celle-ci est nul. La densité de la boue doit être suffisamment élevée de façon à équilibrer la pression des pores des formations et ainsi éviter l'invasion du puits par les fluides des formations

Pour améliorer les propriétés de ces boues, des polymères organiques ou synthétiques sont utilisés. Les polymères les plus utilisés sont essentiellement les dérivés de la cellulose, les bio-polymères, et la gomme de gaur ; l'utilisation de ces polymères est devenue indispensables dans les fluides de forage à base d'eau pour remplacer la boue à base d'huile pour considérations environnementales. De nombreuses études ont été menées en utilisant différents polymères dans la formulation de boues de forage à base d'eau. Ces études ont montré l'efficacité de certains polymères sur les performances rhéologiques et physico-chimiques des fluides. En comparant les différents polymères, le plus utilisé principalement comme réducteur de filtrat est le dérivé cellulosique car il est biodégradable et compatible avec les autres composants de la boue de forage. Parmi les polymères les plus utilisés comme réducteur de perte de fluide dans les boues de forage à base d'eau, il y a celui de la cellulose poly-anionique (PAC) car il a le pouvoir d'augmenter la viscosité de la suspension. Ce dernier est également considéré comme un modificateur de viscosité du système de boue. Deux types de polymère PAC sont disponibles : la faible viscosité et la forte viscosité. Les deux ont le même degré de contrôle de la perte de fluide, mais des degrés de viscosité différents. L'utilisation des additifs malgré qu'elle soit utile et améliore les propriétés des boues pour les rendre plus efficaces, elle fait augmenter considérablement son coût, et elle a un effet néfaste sur l'environnement.

Aujourd'hui, les contraintes environnementales sont de plus en plus rigoureuses, en particulier vis-à-vis des conditions de rejets de déblais de forage pétrolier, ce qui nous oblige à rechercher un composant alternatif pour les fluides de forage qui peut remplacer les polymères sans perturber leurs caractéristiques rhéologiques. Les études de recherche ont tendance à valoriser certains déchets industriels pour les utiliser comme additifs et rendre le coût des opérations de forage plus faible.

Parmi les déchets qui peuvent être utilisés comme additifs pour les boues de forage on trouve les déchets de bois. Selon la littérature, il est à noter qu'aucune étude n'a été réalisée sur l'utilisation de la poudre de bois ou sciure de bois dans la formulation de boues de forage. La sciure de bois désigne tous les déchets de bois ou produit issus d'une boiserie lors des opérations d'usinage effectuées sur la matière première (bois).

Pour cela, et afin de répondre à ces exigences le choix des additifs de boue de forage doit satisfaire d'une part, aux principaux paramètres rhéologiques de la boue, et d'autre part aux propriétés physicochimiques telles que le filtrat API, la densité et le pH.

Notre travail a pour objectifs d'étudier le comportement rhéologique et les propriétés physicochimiques des boues de forage à base d'eau formulées en utilisant des déchets de bois sous forme de poudre de différentes dimensions et concentrations ; pour compléter ce travail, nous avons étudié la résistance de ces boues aux conditions réelles de puits.

Ce travail se divise en trois grands chapitres :

Chapitre 1 : le premier chapitre sera consacré pour des généralités sur les différentes boues de forage, leurs fonctions ainsi que leurs principales propriétés.

Chapitre 2 : le deuxième chapitre traitera des notions sur le bois sa composition et ses différents types

Chapitre 3 : le troisième chapitre est reparti en trois parties :

Partie I : nous avons substitué des polymères (Pac_R et CMC ou le Pac_R et Xcd) par la poudre de bois de pin d'alpes, en étudiant le comportement rhéologique à l'aide d'un rhéographe AR 2000, la viscosité plastique ainsi que le filtrat API.

Partie II : substitution partielle puis totale des polymères Pac_L et Barazan en étudiant toujours les propriétés rhéologiques, physicochimiques, ainsi que le filtrat API. Pour terminer nous avons étudié la résistance des boues formulées, qui ont satisfait les exigences d'utilisation, aux conditions réelles de pression et de température de puits.

Pour finaliser le travail une comparaison économique a été menée pour comparer les une boue actuellement utilisée dans le forage des puits pétrolier et notre boue formulée à l'aide de poudre de bois.

Chapitre I : Fluides

De Forage

1 -Introduction

Le succès technique et économique d'une opération de forage d'un puits pétrolier dépend pour une large part de la qualité du fluide de forage utilisé. Il faut savoir que le coût du fluide proprement dit est relativement faible par rapport au coût global des opérations mais l'optimisation de la composition du fluide en fonction des caractéristiques de la formation à forer peut réduire efficacement le coût global des opérations de forage. Le fluide est préparé dans les bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire, chargé des déblais formés au front de taille (*cuttings*). Avant d'être recyclé, le fluide subit, à la sortie du puits, différents traitements (*tamisage, dilution, ajout de produit*) de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales (Figure -1-). Les boues de forage forment un domaine extrêmement vaste tant en raison de leur nombre ou du nombre de leurs constituants qu'en raison de nombreux facteurs physiques et chimiques qui peuvent les modifier d'une manière réversible ou irréversible. Pour n'en citer que quelques-uns, l'influence des différentes classes granulométriques des divers solides présents dans les boues de forage a un impact important.

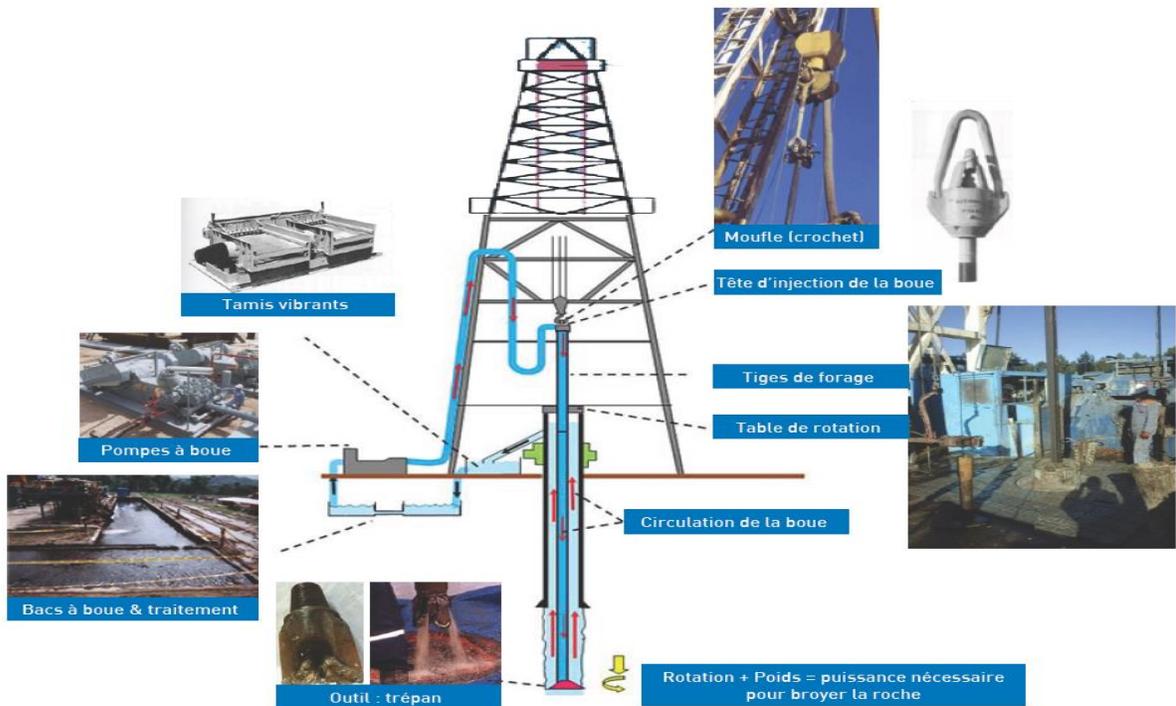


Figure -1- : Ensemble des engins et dispositifs du forage. [1]

On peut, malgré la particularité de chaque formulation, classer les fluides de forage suivant la phase continue qui les compose. On retrouve ainsi :

- Les fluides de forage à base d'eau (*principalement des suspensions*).
- Les fluides de forage à base d'huile (*principalement des émulsions*).
- Les mousses, dont la phase dispersée est un gaz.

2 - Définition d'un Fluide de forage de type boue

La boue de forage est un mélange d'eau ou d'huile, d'argile (*bentonite*), d'additifs chimiques (*polymères*) et de la baryte (*réglage du poids*). Elle permet l'évacuation des déblais et contribue à la compréhension de la nature géologique des milieux traversés. Le fluide doit être compatible avec les roches à forer pour garantir le bon déroulement du forage. A titre d'exemple, l'utilisation d'un fluide de forage de type eau favorise la dilatation de certaines formations et occasionne des gênes dans les opérations. [2] Pallier cet inconvénient a nécessité à recourir au fluide de forage de type huile. La boue de forage permet également de contrebalancer la pression des fluides rencontrés en profondeur afin d'éviter d'éventuelles irrptions en surface. Le forage utilisant la boue peut favoriser la rentrée du liquide dans le puits, humidifier les déblais voire les compacter. Ce qui engendre l'encrassement du puits et empêche la circulation du fluide.

3 - Fonctions

Ce fluide ou boue de forage a plusieurs fonctions dans le cadre d'un forage de puits pétrolier, chaque fonction est importante et répond à un besoin précis. [3, 4, 5]

- *La remontée des déblais* : La circulation du fluide de forage remontant dans l'annulaire doit entraîner les déblais du front de taille jusqu'à la surface. Trois paramètres influent sur l'efficacité du nettoyage de l'annulaire : la vitesse du fluide dans l'annulaire, la masse volumique et la viscosité de la boue.
- *Le maintien des déblais en suspension après arrêt de la circulation* : Pour permettre l'ajout de tige de forage, la circulation doit être stoppée, les déblais ne sont alors soumis à aucun courant ascensionnel et peuvent donc sédimenter. C'est le caractère thixotrope de la boue qui retient alors les déblais.

- *Le refroidissement de l'outil et la diminution des frottements de la garniture de forage :* Cette fonction est notamment largement améliorée par l'utilisation de boue à phase continue huile.
- *Le maintien des parois du trou foré :* La pression hydrostatique est contrôlée par la masse volumique de la boue. Cette pression doit être assez élevée pour maintenir les parois du puits mais pas trop grande pour éviter la fissuration de la roche. Le calcul de la masse volumique nécessaire est donc primordial.
- *Le contrôle des fluides des formations traversées :* Le fluide de forage doit empêcher la venue des fluides présents dans certaines formations et également les pertes par fissuration de la roche forée. La pression hydrostatique doit donc être contrôlée.
- *La transmission de la puissance au moteur de fond :* Dans certains cas l'outil de forage est entraîné en rotation par le fluide de forage.
- *La remontée des informations géologiques :* Les déblais remontés par la boue sont la principale source d'information du géologue, ainsi que l'évolution physico-chimique du fluide de forage (*pH, température, taux de chlorure, etc.*).

Pour donner au fluide de forage toutes les fonctions nécessaires au bon déroulement du forage, la formulation doit être réalisée avec une attention particulière. L'ajout de certains constituants va directement influencer de telle ou telle fonction. Pour exemple, le tableau-1 donne les fonctions principales réalisées par les différents constituants d'une boue de forage à l'huile, chaque constituant ayant également des fonctions secondaires. [39]

4- Caractéristiques des boues de forage

Le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisés selon des normes précises éditées par l'API. Les tests relatifs à l'étude des caractéristiques des fluides de forage sont généralement basés sur quatre paramètres : densité, viscosité, filtrat et réactivité. Certaines mesures sont réalisées systématiquement sur tous les forages (viscosité, densité, filtration) et d'autres en fonction des besoins (taux de gaz, alcalinité). A partir des mesures réalisées et des connaissances acquises, on ajuste si nécessaire la composition de la boue en "temps réel" en ajoutant certains produits ou en reformulant la boue. [38]

Historiquement, face aux problèmes majeurs rencontrés dans les premiers forages, la densité est le premier paramètre fondamental pour la caractérisation des fluides de forage.

4-1- Densité : La densité (ou densité relative) d'un corps est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un autre corps pris comme référence. Pour les liquides et les solides, le corps de référence est l'eau pure à 4 °C. Pour les gaz, le corps de référence est l'air, à la même température et sous la même pression. La densité d'un corps est une grandeur sans dimension et sa valeur s'exprime sans unité de mesure.

4-1-1- Rôle de la densité :

La densité est une caractéristique très importante des boues de forage. Elle doit être suffisamment élevée pour que la pression hydrostatique exercée par la boue sur les formations et les fluides qu'elles contiennent empêche l'éboulement des formations et les venues de fluides. Elle ne doit pas être trop élevée pour que la pression hydrostatique soit inférieure à la résistance des roches en tout point du découvert, afin de ne pas créer des fractures dont une des conséquences est la perte de circulation puis la venue possible d'un fluide. En conséquence nous serons amenés à augmenter ou diminuer la densité des boues pour satisfaire ces impératifs. Alors qu'aucun traitement de boue en cours ne peut affecter la densité :

a) Un accroissement en cours de forage est l'indice : D'un enrichissement de la boue en particules solides (actives ou inertes) en provenance de la formation. Ou d'une venue de fluide de densité supérieure à celle de la boue (eau salée saturée en Na Cl et / ou autres chlorures). [3]

b) Une diminution en cours de forage est l'indice : D'une venue de fluide de densité inférieure à celle de la boue (eau, huile, gaz). Ou d'un bullage de la boue causé par une prise d'air accidentelle dans le circuit surface ou par une action secondaire d'un des additifs en présence dans la boue (dérivée ligneux en particuliers).

4.1.2- Matériel de contrôle

Au niveau du laboratoire, 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. Certains de ces densimètres

permettent de lire directement les densités, les poids volumiques en livres/gallon, livres par cubic foot et les pressions exercées par la colonne de boue en PSI par 1 000 feet.



Figure -2- : *Densimètre pressurisé.* [2] Figure -3- : *Densimètre Classique.* [2]

4-2- La rhéologie :

La rhéologie étudie la déformation des matériaux (cas des solides) ou leur écoulement (cas des liquides) sous l'effet d'une contrainte. Une force appliquée à un corps lui fait subir une déformation. Pour un solide, il y aura déformation élastique si le corps revient à son état initial dès qu'on cesse d'appliquer cette force (c'est le cas de l'élastique que l'on étire) ou déformation plastique s'il revient à son état premier sous l'action d'autres forces (c'est le cas de la boule de mastic que l'on déforme). Pour un fluide, l'action d'une force donne un écoulement. Il existe trois types d'écoulement laminaire, transition et turbulent.

Dans des conditions de température et de pression données, les fluides sont caractérisés :

1. Par leur comportement en régime transitoire représenté par le temps de réponse aux modifications d'écoulement ;
2. Par leur comportement en régime laminaire caractérisé par la courbe d'écoulement expérimentale ou rhéogramme. Le coefficient constant de l'équation d'écoulement représentant cette courbe sont les paramètres rhéologiques, caractéristiques du fluide.

L'équation d'écoulement relie, en régime laminaire, la tension de cisaillement et le taux de cisaillement (ou vitesse de cisaillement ou vitesse de déformation). Pour un fluide donné, elle dépend de la pression et de la température.

4-2-1 - Rhéologie des fluides de forage

Les fluides de forage qu'ils soient émulsion, suspension ou mousse doivent pour être injectés lors du forage être des fluides à seuil rhéofluidifiants avec un comportement thixotrope.

Comme nous le disions plus haut, à chaque forage sa boue et sa formulation particulière. Il est donc difficile de généraliser le comportement de ces fluides. Il est connu que le comportement rhéologique des boues de forage à l'huile se rapproche fortement du comportement d'un matériau ayant des aspects thixotropes en plus de ceux des fluides rhéofluidifiants à seuil [6, 7, 8, 9]. En effet, l'ajout de particules d'argile crée une structure interne qui est susceptible d'être modifiée en fonction des conditions de l'écoulement. Récemment Herzhaft et al. ont montré que la rhéologie des boues de forage et particulièrement d'une boue de forage à base d'émulsion inverse était relativement mal connue aux faibles cisaillements. Ils ont démontré l'existence d'une rupture de pente sur la courbe d'écoulement lors de paliers de contraintes décroissants, [10]. Cette rupture de pente (Figure -4-) fait apparaître un gradient de vitesse critique en dessous duquel le fluide semble avoir un comportement viscoplastique alors qu'au-dessus de celui-ci, le comportement est de type rhéofluidifiant à seuil. Différentes études [11, 12, 13] de ce type de phénomène ont été réalisées pour des systèmes colloïdaux divers. Elles ont démontré l'origine structurelle du gradient de vitesse critique et donc sa forte dépendance temporelle lorsque le matériau se structure lentement. Plus précisément, il semblerait que le gradient de vitesse critique soit associé au phénomène de bifurcation de viscosité observé sur différents matériaux.

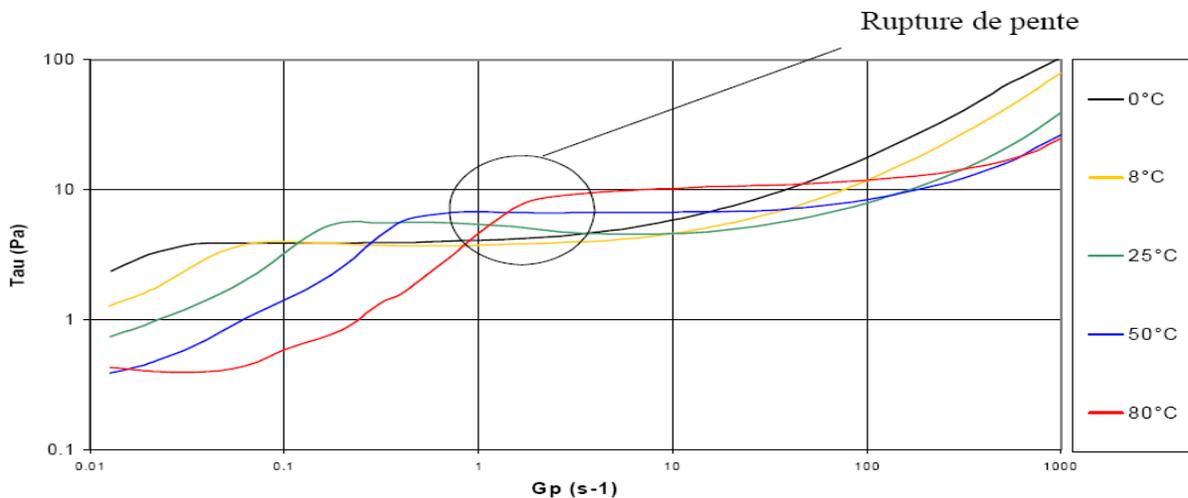


Figure -4- : Paliers de contraintes décroissants sur une boue de forage à l'huile, rupture de pente et thermo-dépendance.

4-2-2- Grandeurs étudiées en rhéologie

On utilise dans la rhéologie le mouvement de cisaillement. Il correspond à un mouvement d'un échantillon entre deux surfaces planes, l'une immobile, l'autre animé d'un déplacement parallèle à la première. Deux grandeurs servent à caractériser quantitativement le cisaillement : la vitesse de cisaillement et la contrainte de cisaillement. Le mouvement de cisaillement est le type de mouvement mis en œuvre en rhéologie.

4-2-2-1- *Contrainte de cisaillement*

La contrainte de cisaillement (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 tangentiellement à la surface de la couche, elles sont appelées force de cisaillement *Figure -5-* [35].

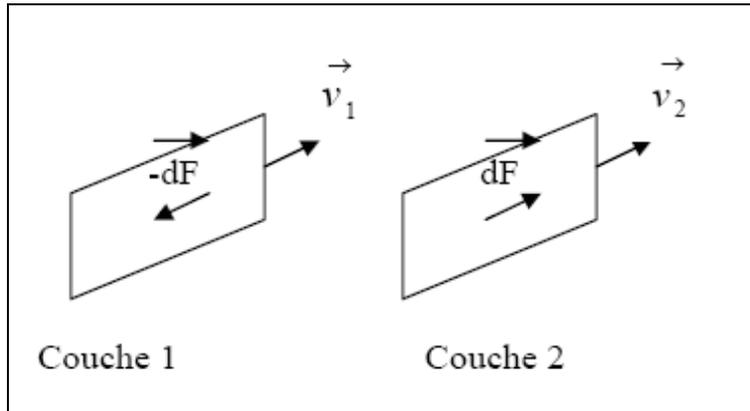


Figure -5- : forces agissant sur deux éléments de couches voisines [35].

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 1) :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (1)$$

τ représente une force par unité de surface (N/m^2) ou (Pa) et dS est la surface élémentaire de l'entité considérée.

4-2-2-2- Déformation de cisaillement

La déformation et vitesse de cisaillement constituent les grandeurs cinématiques fondamentales en rhéologie. La définition de la déformation de cisaillement est présentée dans le cas particulier le plus simple d'un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane. Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile *Figure -6-* [35]. La déformation correspond au vecteur déplacement u de la particule fluide d'une couche sous l'effet du mouvement de cisaillement pendant une durée t .

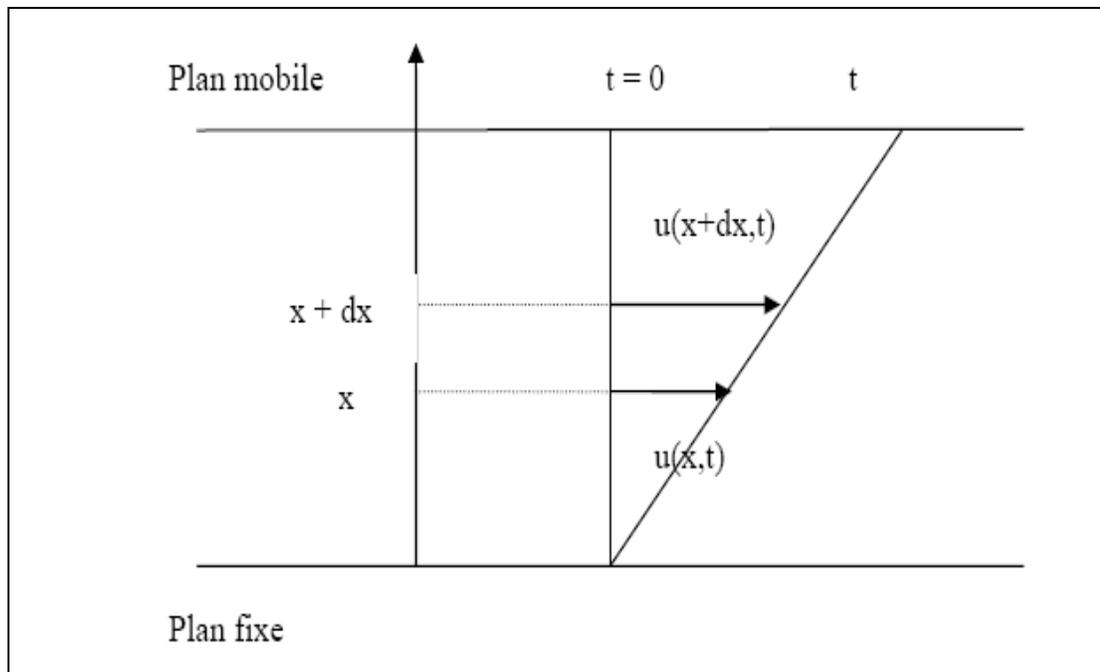


Figure -6- : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles. [35]

On considère arbitrairement que les particules de matière de deux couches adjacentes se trouvent à l'instant $t = 0$ dans une section droite. A l'instant t postérieur, les particules auront parcouru la

distance $u(x,t)$ pour la particule située à l'abscisse x et $u(x+dx,t)$ pour la particule située à l'abscisse $x+dx$. La déformation de cisaillement est définie par l'équation (2) :

$$\gamma = \frac{du(x,t)}{dx} \quad (2)$$

4-2-2-3- Gradient de vitesse

Le gradient de vitesse est une mesure de la vitesse à laquelle les différentes couches se déplacent les unes par rapport aux autres ; ce rapport représente le cisaillement auquel le liquide est soumis. On le désigne sous le nom de taux de cisaillement. L'expression de la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) est donnée par l'équation (3), il s'agit de la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (3)$$

4-2-2-4- Viscosité

La viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. La viscosité dynamique correspond à la contrainte de cisaillement qui accompagne l'existence d'un gradient de vitesse d'écoulement dans la matière.

La viscosité est définie pour un fluide Newtonien comme le rapport de la contrainte de cisaillement, τ , sur le gradient de vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$, avec pour unité le Pa.s. Pour les fluides non Newtoniens, la viscosité est définie comme étant le rapport $\dot{\gamma}/\tau$; il s'agit alors d'une viscosité apparente.

Il est aussi d'usage de définir une viscosité dynamique représentant la résistance à l'écoulement du fluide pour un gradient de vitesse donné comme la dérivée en ce point de la courbe $\tau = f(\dot{\gamma})$.

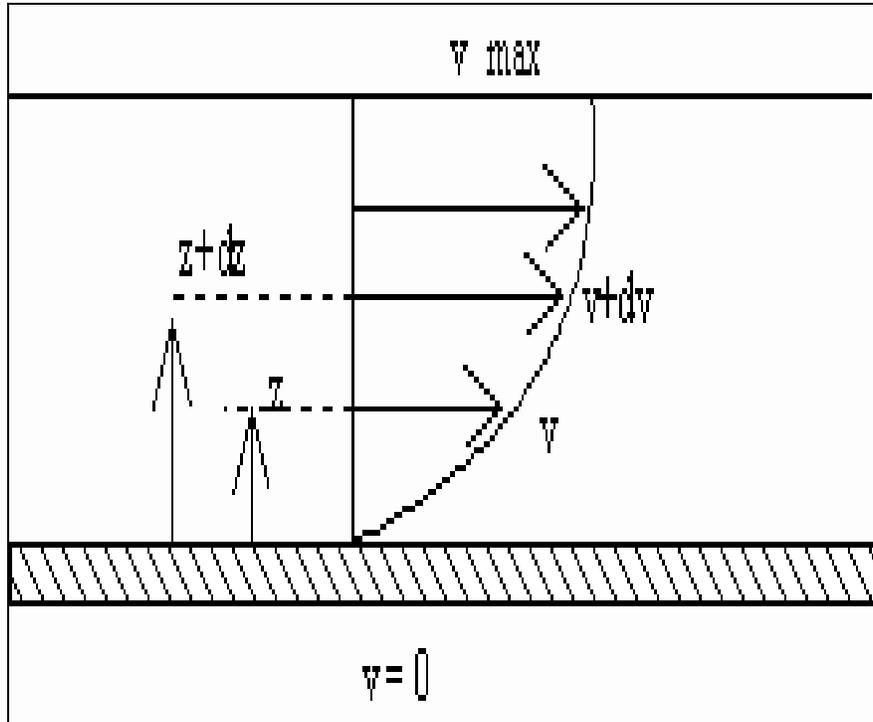


Figure -7- : Représentation d'un écoulement d'un fluide entre deux plaques l'une mobile et l'autre fixe. [35]

Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement d'ensemble, la courbe entre les extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse.

➤ Viscosité apparente

Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres. La vitesse de chaque couche est une fonction de la distance z de cette couche au plan fixe : $v = v(z)$. Considérons 2 couches contiguës distantes de dz .

La force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparation de deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Le facteur de proportionnalité η est le coefficient de viscosité dynamique du fluide.

$$F = -\eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dz} \quad (4)$$

Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit dv , à leur surface S et inversement proportionnelle à dz :

Le facteur de proportionnalité, η , est le coefficient de viscosité dynamique du fluide.

$$\frac{nF / S x}{\partial v / \partial t} = \frac{\text{pression d'entraînement}}{\text{gradient de vitesse}} = \frac{\text{effort de cisaillement}}{\text{taux de cisaillement}}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [\text{Pa.s}] \quad (5)$$

➤ **Viscosité cinématique** : La viscosité cinématique est le quotient de la viscosité dynamique par la masse volumique

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (6)$$

4-2-3- Différents comportements rhéologiques

Dans les systèmes dilués, la distance inter-particulaire est grande par rapport à la taille des particules. Les forces gravitationnelles peuvent être négligées et les propriétés sont indépendantes du temps. Les particules diffusent librement au sein de la suspension pour aboutir à un arrangement aléatoire. Lorsque la concentration en particules augmente, la probabilité d'interactions particule-particule augmente. Les particules s'organisent en entités de plusieurs particules susceptibles de se déformer ou de s'orienter sous l'effet des forces hydrodynamiques [37].

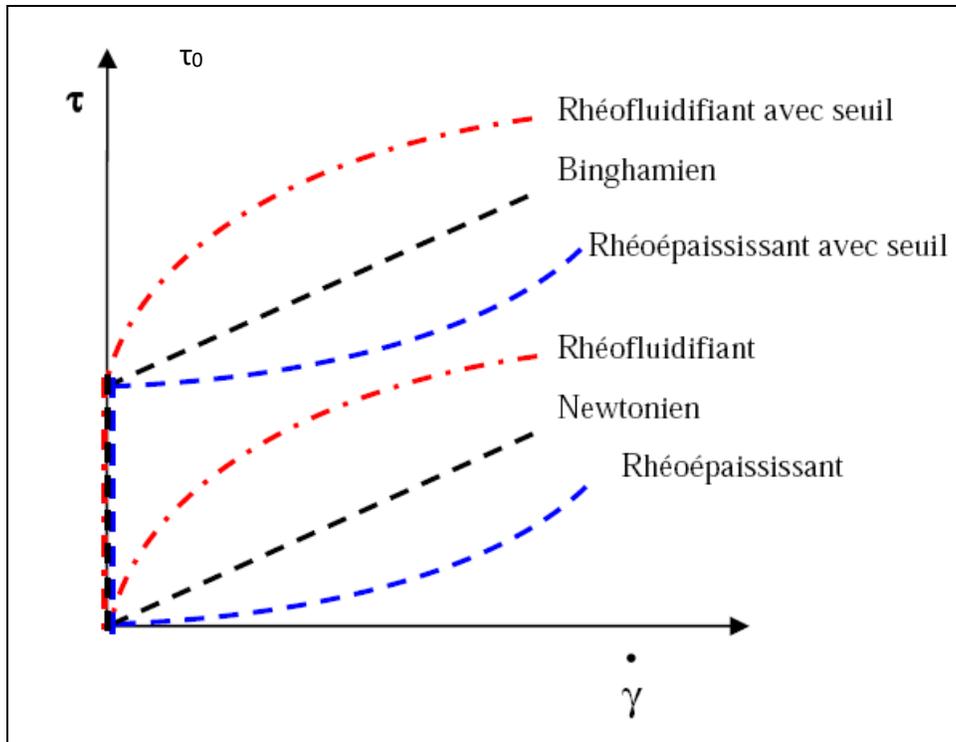


Figure -8- : Courbes d'écoulement des principaux comportements rhéologiques [36].

4-2-3-1- Fluides newtoniens

Les fluides idéaux ou normaux appartiennent à ces systèmes. Ils présentent une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement, τ , et le gradient de vitesse, $\dot{\gamma}$. Le coefficient de proportionnalité, η , tel que $\tau = \eta \dot{\gamma}$, définit la viscosité absolue du fluide. Il est constant, indépendant de la contrainte de cisaillement et du gradient de vitesse [36]. Le rhéogramme d'un tel fluide est donc une droite passant par l'origine, sa viscosité dynamique est constante.

4-2-3-2- Les fluides non newtoniens indépendants de temps

Dans ce cas, la viscosité n'est pas constante. A chaque valeur du couple vitesse de cisaillement, contrainte de cisaillement ($\dot{\gamma}$, τ) correspond une valeur de la viscosité μ . Il en existe quatre catégories principales qui peuvent être regroupées en deux grands groupes :

- Les fluides sans contrainte seuil (les fluides rhéofluidifiants et rhéoépaississants) ;

- Les fluides à contrainte seuil (les fluides plastiques de type binghamien et les fluides plastiques de type Herschel-Bulkley).

a- Les fluides sans contrainte seuil

- *Fluides rhéofluidifiants (ou pseudo-plastique)*

La viscosité apparente est à peu près constante pour les plus faibles valeurs de vitesse de cisaillement imposées et vaut η_0 . Ce rapport décroît ensuite progressivement lorsque la vitesse de cisaillement augmente, jusqu'à atteindre une valeur de viscosité limite (η_∞) [16]. La représentation passe par l'origine avec une décroissance de la dérivée. Donc, La courbe d'écoulement correspondant à ce comportement va s'incurver vers le bas [36].

Les suspensions de particules asymétriques ont souvent ce comportement. De nombreuses solutions de polymères présentent ce type de comportement qui peut être attribué à des macromolécules entremêlées qui se séparent progressivement et s'alignent avec l'écoulement. Dans d'autres cas, cela provient de la disparition des structures qui sont formées par suite de l'attraction entre particules solides.

- *Fluides rhéoépaississants (dilatants)*

Le rhéoépaississement correspond à une augmentation de la viscosité à mesure que le gradient de vitesse croît. Donc, la courbe d'écoulement correspondant à ce comportement va s'incurver vers le haut. Ce comportement est beaucoup moins fréquent. Ce phénomène est lié à la dilatance de la matière ou à des réorganisations associées à un accroissement de la fraction volumique (ex : émulsions de bitume, micelles géantes . . .) [37]. Il concerne des dispersions très concentrées, les solutions d'amidon, sables mouillés et compactés, certaines huiles polymériques et certains amidons dans l'eau.

b- Les fluides à contrainte seuil

L'origine de la contrainte seuil s'explique par l'existence au départ, d'une certaine structure tridimensionnelle rigide (particules emboîtées) ou cohésion (particules floculées due aux forces inter-particulaires dans la suspension. Ces forces peuvent être des forces de friction, des forces

intermoléculaires de Van Der Waals (forces attractives), des forces d'interaction entre les doubles couches (forces répulsives) [36].

➤ *Les fluides Binghamiens*

Ces fluides présentent un seuil d'écoulement τ_s au-delà duquel ils s'écoulent comme un liquide newtonien : c'est le comportement plastique idéal. Si le mélange est suffisamment concentré, il se forme un réseau d'interaction tridimensionnel dans tout le volume. Le fluide présente alors un seuil de contrainte minimum, τ_s , appelé également seuil de plasticité qu'il est nécessaire d'appliquer pour briser le réseau et amorcer l'écoulement [36].

➤ *Les fluides rhéofluidifiant avec contrainte seuil*

Ces fluides présentent un comportement rhéofluidifiant au-delà d'une contrainte seuil. Autrement dit, après une certaine contrainte appliquée, la viscosité diminue lorsque la vitesse de cisaillement augmente.

4-2-3-3- Les fluides non newtoniens dépendants du temps

a- Fluides thixotropes

La thixotropie est la propriété physique de certains fluides de présenter une viscosité dépendante du temps. Les fluides *thixotropes* ont une viscosité qui diminue avec le temps quand on leur applique une contrainte constante à condition que le phénomène soit réversible. Dans ces conditions, la viscosité dynamique n'est plus fixée pour une valeur de contrainte ou de vitesse de déformation, mais dépend également d'un autre paramètre : le temps. Ainsi, lorsqu'on trace dans un même système d'axes les courbes d'écoulement pour un cisaillement croissant, puis pour un cisaillement décroissant, nous obtenons deux courbes. Il s'agit alors d'une boucle d'hystérésis. Ce phénomène est généralement lié à la désorganisation de la structure et est réversible [36]. Un fluide non newtonien peut avoir une caractéristique thixotrope si sa viscosité dépend de la durée d'application de la contrainte de cisaillement. La méthodologie utilisée pour déterminer le caractère thixotrope de fluides consiste le plus souvent en l'application d'un cycle de cisaillement montée-palier-descente *Figure -9-* [35].

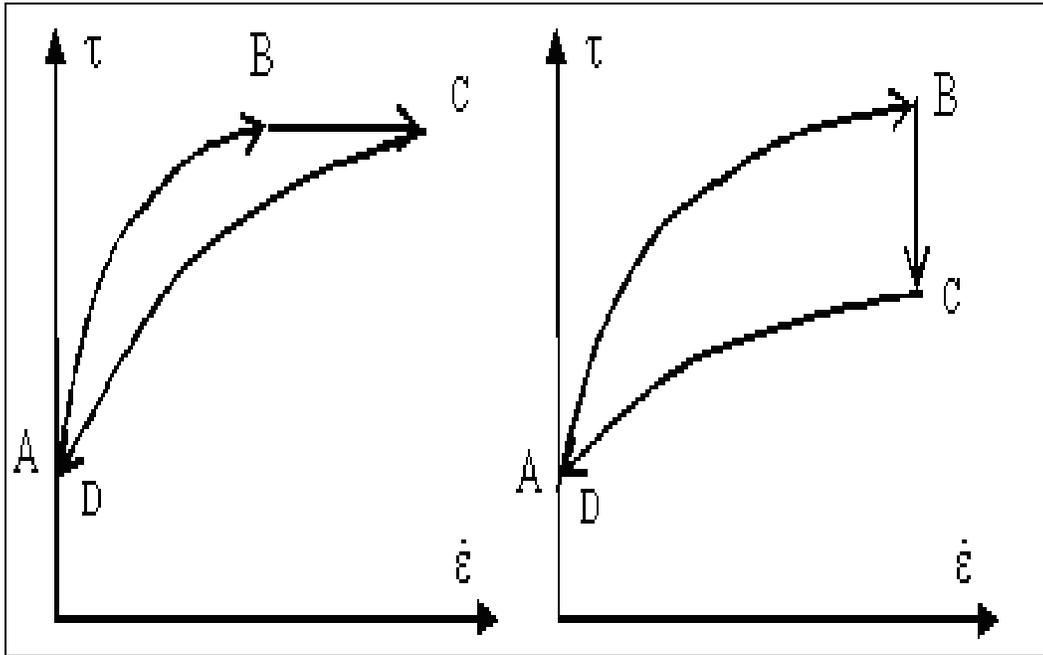


Figure -9- : rhéogramme enregistré par un rhéomètre à contrainte imposée, (à gauche).

Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à vitesse de cisaillement imposée, (à droite). [35]

Un trépan au repos dans un puits de forage peut être cimenté dans sa propre boue, on y injecte avant un arrêt du forage, une boue aux propriétés thixotropiques qui empêche les matériaux environnants de se déposer. Lors d'un redémarrage, elle se liquéfie par vibration.

b- Fluide anti-thixotrope

C'est le phénomène inverse, à savoir qu'à contrainte, τ , ou à gradient de vitesse, $\dot{\gamma}$, donnés, la viscosité dynamique augmente avec le temps.

4-2-4- Modèles rhéologiques

De nombreux modèles, reliant la contrainte de cisaillement τ au gradient de cisaillement $\dot{\gamma}$ ont été développés afin de décrire les comportements rhéologiques les plus couramment rencontrés. Les modèles d'Ostwald-de Waele, de Carreau-Yassuda et de Cross représentent des comportements sans contrainte seuil. Dans le cas des "fluides à seuil", on ajoute la contrainte

seuil (τ_0). Les deux modèles les plus utilisés pour caractériser les fluides à seuils sont, respectivement, le modèle de Bingham (1922) et le modèle de Herschel-Bulkley (1926).

4-2-4-1- Le modèle newtonien

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 reliés par une loi linéaire, la pente de la droite alors obtenue en traçant le rhéogramme est la viscosité du fluide [35].

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (7)$$

4-2-4-2- Modèle d'Ostwald de Waele

La loi de puissance proposée par Ostwald de Waele permet de décrire simplement le comportement rhéofluidifiant ou rhéoépaississant d'un grand nombre de fluides [35]. Elle permet de définir une viscosité apparente qui décroît avec $\dot{\gamma}$ lorsque n est inférieur à 1 (rhéofluidification) et croît avec $\dot{\gamma}$ dans le cas contraire (rhéoépaississement).

$$\eta = \tau/\dot{\gamma} = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (8)$$

Le cas du fluide newtonien est retrouvé pour $n=1$ [37]. La loi d'Ostwald de Waele (équation 8) est la plus communément utilisée. Ce modèle peut décrire le comportement rhéofluidifiant.

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (9)$$

Dans ce modèle, k est appelée la consistance du fluide et l'écart de l'exposant n (ou indice d'écoulement) à l'unité ($0 < n \leq 1$) traduit la non perfection visqueuse du fluide considéré. Parmi les fluides présentant un comportement pseudo-plastique, on compte les suspensions de particules asymétriques, les ciments, les colles, certaines peintures ...

Les fluides dilatants obéissent également à une loi puissance d'Ostwald mais avec $n > 1$, la viscosité apparente augmente lorsque la vitesse de cisaillement croît. Cette catégorie de fluides est beaucoup plus rare que les fluides pseudo-plastiques [35].

En réalité, un fluide n'est en général rhéofluidifiant que pour une certaine gamme de taux de cisaillement. Le modèle de Carreau- Yassuda et de Cross (1965), par exemple, tiennent compte du plateau de la viscosité à cisaillement nul et infini.

4-2-4-3- Modèle de Cross

Le modèle rhéologique de Cross est l'un des plus populaires en service aujourd'hui. Il peut être trouvé pratiquement dans le progiciel d'un rhéomètre, et il peut être utilisé pour extraire les nombres significatifs de l'ensemble de la viscosité et de la vitesse de cisaillement. L'équation de Cross exprimant la viscosité en fonction du taux de cisaillement est :

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (C\dot{\gamma})^m} \quad (10)$$

η_0 : La viscosité au cisaillement zéro, est la valeur de la viscosité au palier newtonien inférieur. C'est une propriété matérielle critique qui peut s'avérer utile pour effectuer des évaluations de la suspension, de la stabilité de l'émulsion, des estimations de poids moléculaire de polymères comparatifs et des changements dus au processus de suivi ou de la formulation des variables etc.

η_{∞} est la Viscosité à l'infini de cisaillement. Ce qui nous indique comment notre produit est susceptible de se comporter dans les situations de traitement très élevé au cisaillement.

Le paramètre "m" est connu sous le nom « constante de taux ». Il est sans dimension, et représente une mesure du degré de dépendance de la viscosité sur le taux de cisaillement dans la région fluidifiée. La valeur de zéro pour "m" indique un comportement newtonien, et avec m tend vers unité, le comportement est de plus en plus rhéofluidifiant.

Le paramètre "C" est connu comme la constant du temps de Cross (ou parfois de la consistance). La réciproque, 1/C, donne un taux de cisaillement critique qui prouve un indicateur utile du taux de cisaillement pour un rhéofluidifiant.

4-2-4-4- Le modèle bingham

Le modèle de Bingham est le plus simple de ces modèles, le fluide de Bingham s'écoule lorsqu'un seuil minimal de contrainte τ_b est dépassé. Ce modèle permet de décrire le

comportement rhéologique de nombreux matériaux (boues de forage, peintures à l'huile, certaines graisses...). Equation d'état du modèle de Binghamien s'écrit :

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl}\dot{\gamma} \quad (11)$$

Où η_{pl} est la viscosité plastique,

4-2-4-5- Le modèle de Herschel Bulkley

Le modèle d'Herschel-Bulkley est celui permettant de décrire la plupart des fluides plastiques (fluides à seuil), la courbe d'écoulement de tels fluides finit par devenir rectiligne au-delà d'une certaine contrainte critique appliquée [35]. Il s'agit en fait d'une loi de puissance à laquelle on a ajouté le terme τ_s [34, 36].

$$\tau = \tau_s + k \dot{\gamma}^n \quad (12)$$

Où n l'indice d'écoulement et k la consistance du fluide.

Si $n = 1$, le fluide a un comportement Binghamien,

Si $n < 1$, le fluide est dit rhéo-fluidifiant avec seuil,

Si $n > 1$, le fluide est dit rhéo-épaississant avec seuil.

4-2-4-6- Model de Casson

Dans le cas particulier des fluides rhéofluidifiants avec seuil d'écoulement, il est possible d'utiliser l'équation de Casson (équation 13). Ces fluides présentent un comportement plastique fluidifiant avec, généralement, une « région newtonienne » pour des vitesses de déformation élevées.

$$(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_s})^2 = \eta \dot{\gamma} \quad (13)$$

Où τ_s est le seuil de Casson et η la viscosité de Casson.

Détermination expérimentale des caractéristiques rhéologiques :

Les appareils utilisés sont : Le viscosimètre Marshet le viscosimètre Fann.



Figure -10- : Viscosimètre Marsh. [2]



Figure -11- : Viscosimètre Fann. [2]

4-3- Filtration :

Le mécanisme de filtration peut être expliqué de la manière suivante :

Nous avons d'une part une formation poreuse et perméable et d'autre part une suspension argileuse dans de l'eau qui sous l'effet d'une pression différentielle tendra à pénétrer dans la formation.

a. Si toutes les particules de la boue sont plus petites que les pores du milieu perméable. Toute la suspension traversera le milieu perméable. Ce cas extrême est entre autres celui des pertes de circulation. Les caractéristiques rhéologiques peuvent freiner ou même arrêter le phénomène.

b. Si une partie des particules est plus grosse que les pores du milieu perméable, elle sera retenue tandis que le liquide et les particules les plus fines pénétreront dans la formation.

Après un temps plus ou moins long les particules les plus fines colmateront le dépôt déjà formé par les particules grossières et ainsi sera formé un film plus ou moins imperméable qui laissera filtrer peu ou pas de phase liquide. Ce phénomène est appelé filtration, le liquide qui passe filtrat et le dépôt solide sur la paroi cake.

c. Si toutes les particules sont plus grosses que les pores du milieu perméable, seul le liquide ou filtrat pénètre dans la formation. Ce cas diffère peu du précédent car c'est la perméabilité du cake qui intervient dans la valeur de filtration et non pas celle de la formation.

En pratique les opérations de mise en production, de diagraphies différées dans les puits montrent que la phase liquide de la boue et parfois la boue elle-même envahit les formations perméables sur un rayon plus ou moins important.

On schématise ces phénomènes au laboratoire par la filtration de la boue sur un milieu filtrant standard constitué par un papier filtre normalisé (API).

Ce phénomène a été étudié et, pour en déterminer les lois, on applique la Loi d'écoulement de Darcy, le milieu perméable étant constitué par le cake.

4-3-1- Rôle de la filtration : Les phénomènes de filtration de la boue sont extrêmement importants car ils conditionnent en partie :

- ✓ La vitesse d'avancement du forage.
- ✓ La tenue des terrains forés.
- ✓ L'envahissement des couches perméables.

4-3-1-1- Vitesse d'avancement du forage : En maintenant constants les paramètres de forage, on constate que dans bien des cas, en particulier dans les formations marneuses, perméables ou mal consolidées, la vitesse d'avancement est plus importante avec des filtrats élevés.

Ceci s'explique du fait que le filtrat aide à la désagrégation des roches et facilite ainsi le travail de l'outil.

Malheureusement, comme nous allons le voir, des valeurs élevées de filtrat ne sont pas compatibles avec d'autres impératifs plus importants.

4-3-1-2- Tenue des terrains : S'il n'y a pas ou peu de problèmes de ce type au droit de formations consolidées (grès ou calcaire) il n'en est pas de même dans des zones mal consolidées telles que marnes et sables par exemple. L'invasion de telles zones par un filtrat important créera une instabilité des parois du fait de l'hydratation des marnes et argiles ou du délitage des sables.

De plus à un filtrat élevé correspond un cake épais qui en réduisant le diamètre du sondage peut créer en manœuvre des surpressions et/ou dépressions nuisibles à la tenue du forage et à l'équilibre des couches.

Un cake épais possède de mauvaises caractéristiques mécaniques qui rendent aisée sa destruction par les manœuvres et la rotation de la garniture.

Il ne remplit donc plus son rôle de consolidation des parois.

Enfin un cake épais rend difficile la réalisation de cimentations de bonne qualité derrière les tubages mis en place.

4-3-2- Matériel de contrôle :

Deux types d'appareils sont normalisés, un filtre-presse dit API avec lequel la filtration s'opère à basse pression et à la température ambiante et un filtre-presse haute pression et haute température. De nouveaux appareils de laboratoire permettent de quantifier la filtration en dynamique et verticalement, afin d'obtenir une valeur plus représentative des conditions réelles.

- ✓ Filtres-presses API :
- ✓ Filtre-presse haute pression et haute température



Figure -12- : Filtre-presse API, Filtre-presse haute pression et haute température [2]

4-4- Emulsions :

Une émulsion peut être définie comme un système contenant deux phases liquides dont l'une est dispersée dans l'autre sous forme de fines gouttelettes.

On appelle boue émulsionnée une boue dans laquelle l'huile est dispersée dans la phase aqueuse. On la désigne parfois par "émulsion directe". Ceci par opposition aux boues à émulsion inverse dans lesquelles l'eau est dispersée dans la phase huileuse. [3]

4-4-1- Principe et rôle des émulsions :

4-4.1.1- Boues à émulsion directe BED :

Pour émulsionner une boue, on y ajoute de l'huile (gas-oil, fuel brut etc) et parfois un agent émulsifiant.

Les argiles et les colloïdes organiques étant eux-mêmes des émulsifiants de l'huile dans l'eau, si l'on ne désire pas une émulsion très fine il n'est généralement pas nécessaire de recourir à un produit spécial.

L'addition d'huile dans une boue s'effectue lentement, de l'ordre de 500 à 1 000 litres à l'heure, directement dans le circuit.

Les concentrations d'huile usuellement employées se situent entre 5 et 12 % en volume.

Pourquoi ajoute-t-on de l'huile dans une boue à l'eau ??

Les raisons sont brièvement les suivantes :

- ✓ Permettre le dépôt d'un cake fin, résistant et à grand pouvoir lubrifiant réduisant les frottements du train de tiges sur les parois du puits, permettant un poids plus élevé sur l'outil à lecture égale à l'indicateur de poids donc, une plus grande vitesse d'avancement.
- ✓ Alléger la boue grâce à la faible densité de l'huile (0,85).
- ✓ Imperméabiliser le cake et obtenir ainsi de plus faibles filtrats API.
- ✓ Réduire la dispersion d'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 de façon importante (surtout avec les bruts) sans amélioration, notable du pouvoir lubrifiant. Aussi au-delà de cette limite, si on désire accroître le pouvoir lubrifiant il est préférable d'ajouter un produit spécifique (tensioactifs à faible concentration ou résidus sulfonés à concentrations plus importantes).

4.4.1.2- Boue à émulsion inverse :

Contrairement aux émulsions directes, les émulsions eau dans huile nécessitent la présence d'émulsifiants puissants. On constate plusieurs boues de ce type qui sont commercialisées, chaque fabricant possédant ses propres émulsifiants. Le pourcentage d'eau peut atteindre 50 % de la phase liquide dans ce type de boue.

Ce type de boue est utilisé parce qu'il donne un filtrat qui est constitué uniquement par de l'huile ce qui permet de résoudre certains problèmes de forage et d'exploitation. [3]

4.4.2- Matériel de contrôle :

Dans le cas d'une émulsion directe la stabilité de l'émulsion n'est pas un problème préoccupant, seul la teneur en huile est contrôlée à l'aide du distillateur.

Pour les boues à émulsion inverse, en plus du contrôle du rapport eau-huile-solides, il est nécessaire de mesurer la stabilité de l'émulsion.

Cet appareil est employé pour contrôler la stabilité des émulsions dans les boues inverses.

- ✓ Testeur d'émulsion



Figure -13- : Testeur d'émulsion. [2]

Tableau-1- : Principaux produits entrant dans la formulation d'une boue de forage à l'huile et leur rôle respectif.

<i>Produit</i>	<i>Rôle</i>
<i>Huile désaromatisée</i>	Constitue la phase continue de l'émulsion. Elle doit : -Lubrifier l'outil de forage. -Réduire les frottements.
<i>Réducteur de filtrat</i>	Limiter l'endommagement en formant un "cake" efficace.
<i>Emulsifiant</i>	Stabiliser l'émulsion
<i>Agent mouillant</i>	Diminuer les tensions inter-faciales et stabiliser l'émulsion et les solides.
<i>Chaux</i>	Réserve d'alcalins en cas de pollution (Expérimentalement, stabilise l'émulsion).
<i>Argile organo-phile</i>	Donner les propriétés rhéologiques souhaitées.
<i>Viscosifiant</i>	Augmenter la viscosité à bas gradient de vitesse.
<i>Saumure</i>	Former l'émulsion, obtenir les propriétés rhéologiques.
<i>Alourdissant (Barite ou Carbonate de Calcium)</i>	Contrôler la densité de la boue.

5 - Composition des différents types

Historiquement, les fluides de forage ont évolué d'un simple mélange d'eau et d'argile appelé "boue " vers des systèmes de plus en plus complexes composés d'eau ou huile avec une multitude d'additifs répondant aux caractéristiques requises et aux problèmes rencontrés. Les fluides de forage sont des fluides complexes classés en fonction de la nature de leurs constituants de base. Traditionnellement, les fluides de forage ont été classés en trois catégories selon le fluide de base utilisé dans leur préparation : l'air, l'eau ou l'huile. [14]

Les propriétés exigées des boues de forage sont multiples et peuvent parfois même être contradictoires. Les boues doivent par exemple être très visqueuses pour assurer la remontée des déblais, mais la viscosité ne doit pas être trop élevée afin de limiter les pertes de charge dues à l'écoulement et afin d'éviter la fracturation de la formation. De nombreux composants multifonctions sont donc ajoutés à la boue pour lui conférer les propriétés désirées [40]. Il est possible de classer grossièrement ces composants en 20 catégories. [15]

Tableau -2- : Principaux additifs d'un fluide de forage

1	Contrôleurs d'alcalinité	11	Lubrifiants
2	Bactéricides	12	Décoinçants (ou dégrippants)
3	Anti-calcium	13	Inhibiteurs de gonflement des argiles
4	Inhibiteurs de corrosion	14	Produits facilitant la séparation
5	Anti-mousses	15	Stabilisants haute température
6	Agents moussants	16	Défloculants
7	Emulsifiants	17	Viscosifiants
8	Réducteurs de filtrat	18	Alourdissants
9	Floculants	19	Saumures
10	Colmatants	20	Huile minérale ou organique

5.1 Les fluides à base d'eau :

Ces fluides sont souvent désignés par "Water-Based Muds" ou WBM. Ils sont dans la plupart des cas constitués par des suspensions de bentonites dans l'eau (30 à 60 g/L) dont les caractéristiques rhéologiques et de filtration sont souvent ajustées par des polymères. La nature des électrolytes et leur concentration dans les formulations de boues à l'eau sont choisies en prenant en compte les caractéristiques de la formation (*activité de l'eau des formations argileuses, dissolution des formations salines*). [38]

Parmi les additifs on peut trouver des viscosifiants: argiles naturelles (*souvent des bentonites, polymères synthétiques ou bio-polymères*) ; des réducteurs de filtrat servant à consolider le cake de filtration pour limiter l'invasion par le fluide: amidons, carboxyméthyl celluloses ou CMC, celluloses polyanioniques (PAC), ou résines; des inhibiteurs de gonflement et de dispersion des argiles: KCl, glycérol, silicates ou divers polymères comme le poly-acrylamide partiellement hydrolysé (PHPA), les poly-alkylène-glycols (PAG); des agents alourdissant comme la barytine ("*barite*" ou sulfate de baryum $BaSO_4$) et la calcite (*carbonate de calcium $CaCO_3$*) qui sont les plus utilisés pour assurer à la boue une densité convenable. On note aussi l'utilisation de l'hématite (Fe_2O_3) ou de la galène (PbS). La calcite est souvent recommandée pour le forage de la phase réservoir à cause de sa solubilité dans l'acide et de son utilisation selon une granulométrie

variable pour réduire les problèmes de pertes et d'endommagement ; et enfin des colmatants, additifs plutôt exotiques comme des granuleux (*coquilles de noix*), des fibreux (*fibres de bois, canne à sucre*), et des lamellaires (*coquilles d'huîtres, céréales*). [16]

5.2 Les fluides à base d'huile :

L'origine de l'utilisation de l'huile dans les fluides de forage remonte aux premiers forages effectués à Oklahoma City (1934-1937) au cours desquels on a constaté une amélioration des performances de forage après ajout de l'huile brute. [17]. Les fluides à base d'huile sont des fluides dont la phase continue est une huile minérale (*pétrole brut, fuel, gazole, ...*) et la phase dispersée est de l'eau.

Par définition les fluides de forage à base d'huile contenant plus de 5% d'eau sont appelés boues de forage en émulsion inverse ; avec moins de 5% d'eau, on a les boues à l'huile. [18]. Ces fluides sont souvent désignés par "Oil-Based Muds" ou OBM. La phase continue la plus utilisée jusqu'à ces dernières années était le gazole, mais actuellement la législation relative à la protection de l'environnement impose l'utilisation d'huiles minérales ou "synthétiques", ne contenant plus de composés aromatiques. Des agents émulsifiants et mouillants sont alors utilisés pour favoriser la stabilité de l'émulsion.

Les propriétés rhéologiques (*thixotropie*) de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents viscosifiants, généralement des argiles organophiles. Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrat (*composés asphalténiques et polymères*) et d'autres additifs spéciaux. Il faut signaler qu'aujourd'hui la plupart des travaux de recherche portent sur l'amélioration des boues inverses synthétiques, vu leurs avantages économiques et environnementaux, comparativement aux fluides classiques à base de gazole.

5.3 Les fluides de forage gazeux

Ce sont des fluides dont la phase continue est du gaz mélangé avec de l'eau en proportions variables provenant de la formation traversée (*inévitablement*) ou ajoutée intentionnellement. Le gaz peut être de l'air ou du gaz naturel, et peut appartenir à une mousse ou à un brouillard. Citons brièvement les fluides gazeux utilisés :

► Forage à l'air

L'air est le fluide de forage qui possède la plus basse densité et le prix de revient le moins élevé, mais le forage à l'air qui a commencé en 1940, devient difficile lors de venues importantes d'eau. Il apporte une solution à des problèmes compliqués parfois impossibles à résoudre avec les méthodes de forage à la boue conventionnelle. Il est recommandé dans le cas des pertes totales répétées de la boue lors de la circulation ainsi que dans le forage des couches productrices sous faible pression. En Algérie, les premiers forages à l'air ont été réalisés entre 1954 et 1960 dans la région de Tebessa sur les puits Djebel Foua, Djebel Onk [19]. Suite aux pertes importantes rencontrées dans la région [20].

D'autres forages ont été réalisés en 1970 à Djebel Lazreg. D'une façon générale, le forage à l'air a réduit le coût du forage de 50 à 60% par rapport au forage à la boue dans le bassin [21].

► Forage à la mousse

Les mousses sont des dispersions d'un volume de gaz (*relativement*) important dans un volume de liquide relativement faible. Elles sont utilisées comme fluides de forage lorsque les terrains traversés sont fracturés, ou lorsque le forage à l'air est impossible parce que la pression nécessaire ne peut être fournie sur le chantier.

L'avantage du forage à la mousse se résume par sa faible pression hydrostatique au fond et par son excellent pouvoir de remontée des déblais à moins que la mousse ne refroidisse pas convenablement les terrains traversés ainsi que le train de sonde et ne contrôle pas la tenue des parois du puits (pas de cake).

Des problèmes de sécurité au sujet de l'utilisation de la mousse en réservoir sont à signaler, notamment des explosions dans le cas où le volume d'hydrocarbures gazeux est compris entre 3 et 10% par rapport à l'air. C'est le cas en 1992, du puits RB- 13 en Algérie, où lors d'une opération de reprise de puits (de "work-over") avec une boue à la mousse pour éviter les pertes de circulation, une explosion s'est produite suite à une contamination de la boue par une venue d'huile ou de gaz [19].

► Forage à la boue aérée

Le forage à la boue aérée est utilisé afin d'éviter les pertes de circulation et pour avoir un fluide de forage plus léger. Les avantages sont une bonne tenue des parois grâce à un cake contrôlé, une tendance aux pertes de circulation fortement réduite et une vitesse d'avancement plus grande, une assez bonne capacité de refroidissement des terrains traversés et du train de sonde, à moins que la stabilité de la boue aérée ne soit liée à une circulation effective des fluides.

6 - Circuits de fluides de forage

La circulation de fluides dans le forage s'opère en deux modes [22] :

6-1- Circulation normale

Dans le circuit normal le fluide se refoule dans le train de tiges à partir de la pompe à boue (à partir de compresseur s'il s'agit de l'air comprimé), circulant de haut en bas pour sortir au fond du forage à travers les trous de l'outil de forage (trépan), se mélange avec le cuttings, puis le mélange fluide-cuttings remonte, dans l'espace annulaire (espace entre les parois de forage et les parois de tubings) pour rejoindre la fosse à boue où s'effectue l'échantillonnage, l'analyse, le traitement, l'ajustement et la décantation ; puis de nouveau il sera aspiré par la pompe à boue pour qu'il sera refoulé vers le train de tiges, et ainsi de suite.

6-2- Circulation inverse

Dans la circulation inverse, le fluide se refoule dans l'espace annulaire, et le mélange fluide-cuttings remonte dans le train de tige en entrant par les trous se trouvant au fond du trépan.

7 - Recommandations pour l'utilisation des fluides de forage

- En présence de nitrates dans l'eau de la nappe ; les boues bentonitiques peuvent réagir et flocculer.
- Certaines boues peuvent être dopées avec des composants pouvant polluer la nappe.
- Les boues polymères conviennent parfaitement pour la réalisation des forages profonds de recherche pétrolière, car, les nappes supérieures sont rapidement isolées par tubages ; alors que pour le foreur d'eau, a pour mission de détecter ces nappes.

- Afin de protéger les nappes, une série d'essais sur ces boues et mousses devrait être prévue dont les résultats permettraient de rédiger une réglementation concernant la qualité et l'emploi des produits entrant dans la composition de ces boues.

Tableau -3- Les principales caractéristiques des boues de forage

<i>Caractéristique</i>	<i>Appareils de mesure</i>	<i>Conséquences et interprétations</i>	<i>Remèdes</i>
Densité <i>(Moyenne de 1,2)</i>	Balance BAROID	Trop forte : -risque de perte de boue. -cake trop épais. Trop faible : -cake trop mince -risque de dégradation des parois -éboulement et éruption si artisanisme.	Dilution par l'eau en contrôlant les autres Brasser énergiquement.
Viscosité <i>(Moyenne De 40 à 45 Secondes)</i>	MARSCH Viscosimètre MARSCH, Viscosimètre STORMER	Trop forte : -difficulté de pompage -risque de coincement pendant les arrêts de circulation. Trop faible : -risque de perte de boue et de coincement par séparation des éléments constitutifs de la boue.	Emploi de, pyrophosphate, de tanins, de lignites, de ligno-sulfates
Filtrat <i>5 à 10 cm3</i> Cake <i>5 mm maximum</i>	Filtre- presse BAROID	Trop grand = cake trop mince -risque d'éboulement et de perte de boue Trop faible = cake trop épais -risque d'aveuglement des venues d'eau	Ajouter Amidon, fécule ou CMC. Mixer, brasser.
Teneur en sable	Tamis BAROID	Risque d'usure des pompes à boue.	Employer les dessableurs à cyclones.
pH 7 à 9,5	Papiers Colorimétriques	pH>11: contamination par le ciment ou par l'eau de la formation pH<7 : excès d'acidité, risque de floculation	Employer : - Les polyphosphates acides si pH>11 - Ou neutre si pH<7

Chapitre II : Le Bois

1- Introduction

Les opérations de transformation et de conditionnement du bois, depuis la grume jusqu'au produit final, entraînent la production de déchets de toute sortes, d'une grande hétérogénéité de taille comme de forme. On considère que le rendement global de la chaîne, de l'exploitation forestière au produit final, est de l'ordre de 15 %, sans valorisation connexe des déchets. Si on se limite à la stricte chaîne de transformation, de la scierie au produit final, sans intégrer les bois abattus abandonnés en forêt, le rendement est rarement supérieur à 25 %. Ces chiffres illustrent l'importance de la valorisation des déchets, chutes et résidus divers des industries du bois dans un contexte de développement durable et de gestion équitable des ressources naturelles. [50]

2- Le bois

Le bois, matière organique, apparaît d'un point de vue macroscopique comme un matériau composite naturel. Il se compose principalement de fibres creuses longitudinales appelées trachéides (*Figure-14-*) qui assurent différents rôles dans l'arbre : [23]

- Un rôle de conduction de la sève : les trachéides sont reliées entre elles par de légères ouvertures (*les ponctuations aréolées*) qui permettent à la sève et à l'eau de migrer dans l'arbre.
- Un rôle de soutien mécanique : les trachéides constituées essentiellement de cellulose sont emprisonnées dans une matrice de lignine qui confère au bois ses caractéristiques mécaniques.
- Un rôle de stockage, de restitution, d'élaboration et de transformation chimique de substances. En cela, le bois est formé d'une structure en caissons. Ces caissons ponctués entre eux contiennent naturellement différentes substances chimiques liquides ou gazeuses plus ou moins liées à la structure solide du bois.

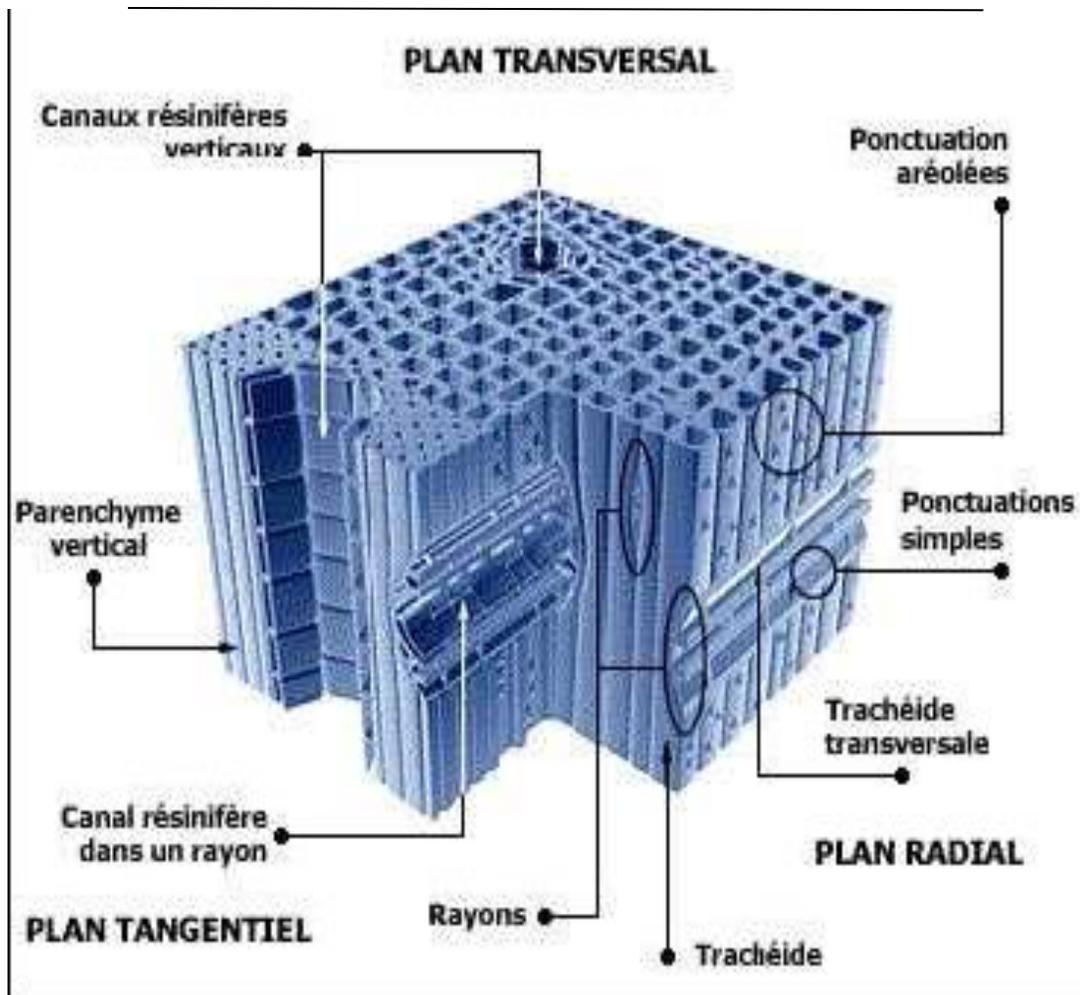


Figure -14- : Eléments du plan ligneux des bois résineux [24]

Le bois est un matériau hétérogène, on parle d'une grande variabilité inter et intra spécifique [24]. A l'image de tout être vivant, un arbre est un « individu » et se distingue par conséquent de ses voisins. Des variations au sein du même arbre peuvent aussi être mises en évidence : la présence de nœuds, de bois de réaction ainsi que des différences dues à la duraminisation. Cette variabilité a des conséquences directes sur de nombreux caractères du bois et est essentiellement liée à des différences de composition chimique (*Tableau -4-*) et d'organisation cellulaire. [51]

A cette hétérogénéité naturelle s'ajoutent les variations de forme et de granulométrie : sciures, écorces, plaquettes, bûches, etc., et celles dues à la nature hygroscopique du matériau bois. De plus, les produits ajoutés au bois lors des phases de mise en œuvre industrielle peuvent conduire à une modification sensible du matériau sur les plans chimique et physique.

2. Constitution Chimique

Les constituants chimiques du bois peuvent être classés en deux groupes de substances (Figure -15-) :

- les substances macromoléculaires des parois cellulaires (*cellulose, hémicelluloses, lignine*) présentes en quantité abondante dans toutes les essences,
- les substances de faible poids moléculaire (*extraits, substances minérales*) généralement plus spécifiques de certaines espèces de bois.

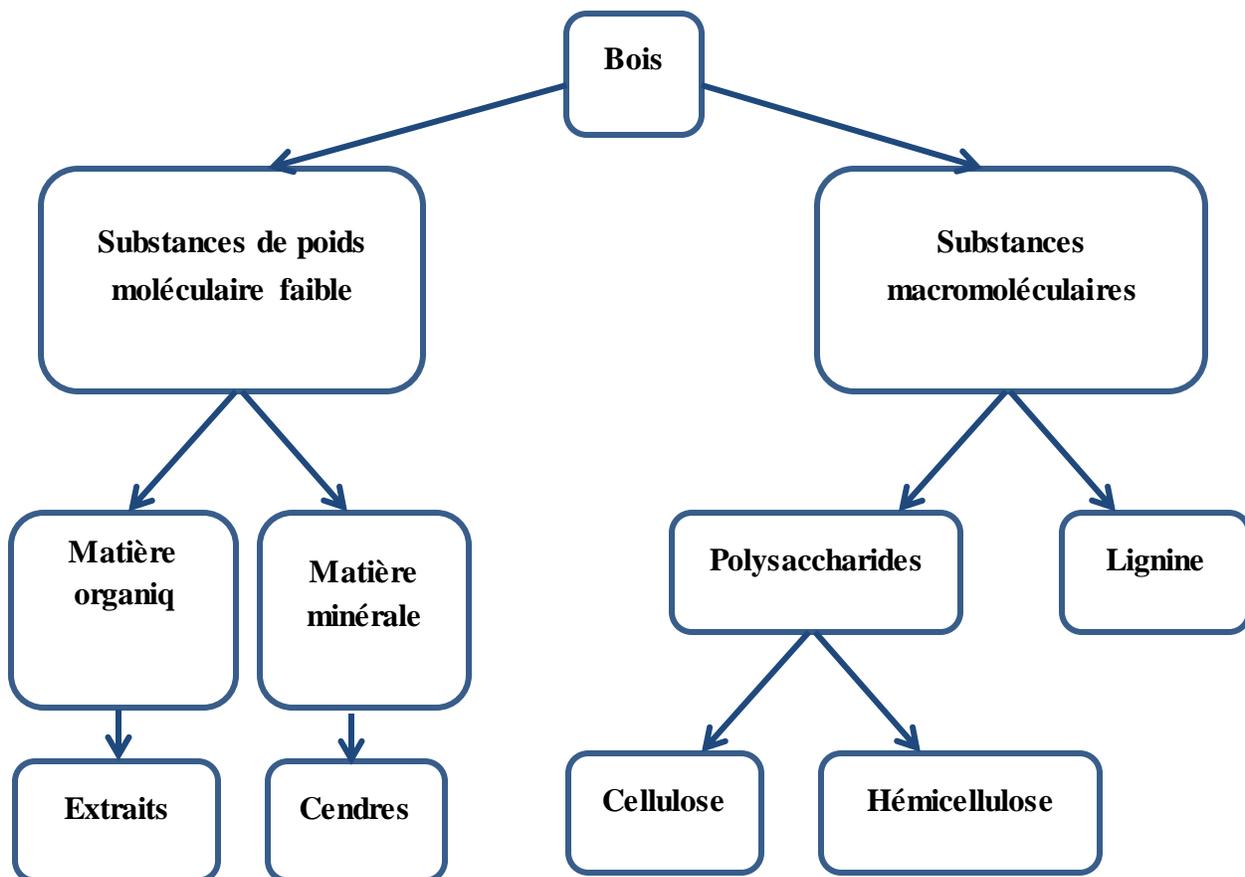


Figure -15- : Schéma général des constituants chimiques du bois

Le bois est composé à plus de 95 % de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. Comme il est spécifié dans le paragraphe précédent, la composition du bois peut varier sensiblement selon les essences, les individus et même selon l'emplacement du bois dans l'arbre. [52, 53, 54] Le Tableau -3- reprend les résultats de plusieurs recherches menées par ROESYADI [25] et ALEN [26] :

Tableau -4- : Composition chimique de différents bois

<i>ESPECES DE BOIS</i>	<i>CELLULOSE (%)</i>	<i>HEMICELLULOSE (%)</i>	<i>LIGNINE (%)</i>	<i>EXTRACTIBLE (%)</i>	<i>CENDRES (%)</i>
<i>FEUILLES AMERICAINS</i>	43-47	25-35	16-24	2-8	-
<i>FEUILLES FRANÇAISES</i>	40-46	21-29	20-26	1-5	-
<i>BOIS TROPICAUX</i>	42-50	14-18	28-32	1-8	-
<i>RESINEUX AMERICAINS</i>	40-42	25-29	25-31	1-5	-
<i>PINS SYLVESTRE</i>	40,8	25,9	29,5	3,4	0,4

2.1. La lignine

La lignine présente dans les tissus vasculaires accroît les propriétés de résistance mécanique du bois. Ses teneurs sont très variables selon les végétaux : dans le bois, la teneur varie de 15 à 35 %. La distribution de la lignine dans la paroi cellulaire et sa teneur à différents endroits d'un arbre ne sont pas homogènes.

De façon générale, la structure de la lignine naturelle dépend de l'origine botanique, de l'âge de la plante, du type de tissu, des cellules et des couches pariétales dans lesquelles se trouve la lignine. Cette forte variabilité naturelle associée aux variations relevant des méthodes d'analyse rend difficile la représentation de la structure des lignines. [57]

Elle est issue de la polymérisation de trois types de précurseurs : les alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique représentés sur la *Figure -16-*.

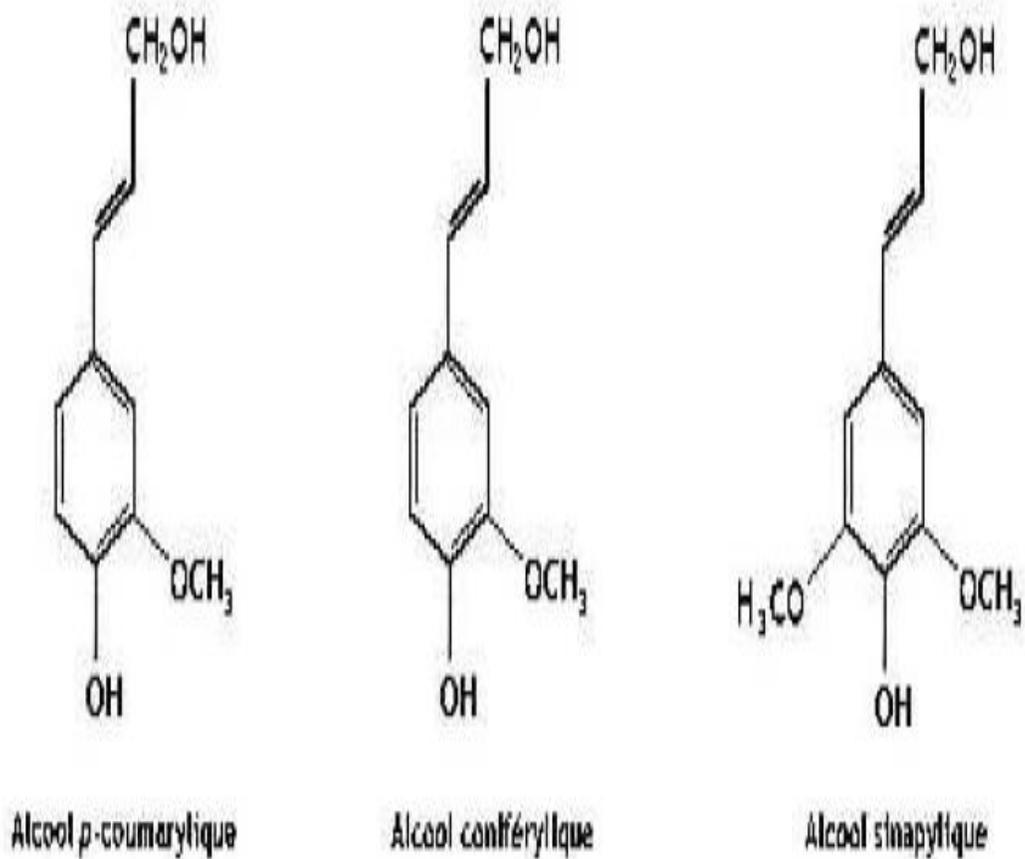


Figure -16- : Alcools précurseurs de la lignine

Quelques travaux réalisés par FREUDENBERG [27] ou ADLER [28] ont permis de proposer des structures possibles pour la lignine.

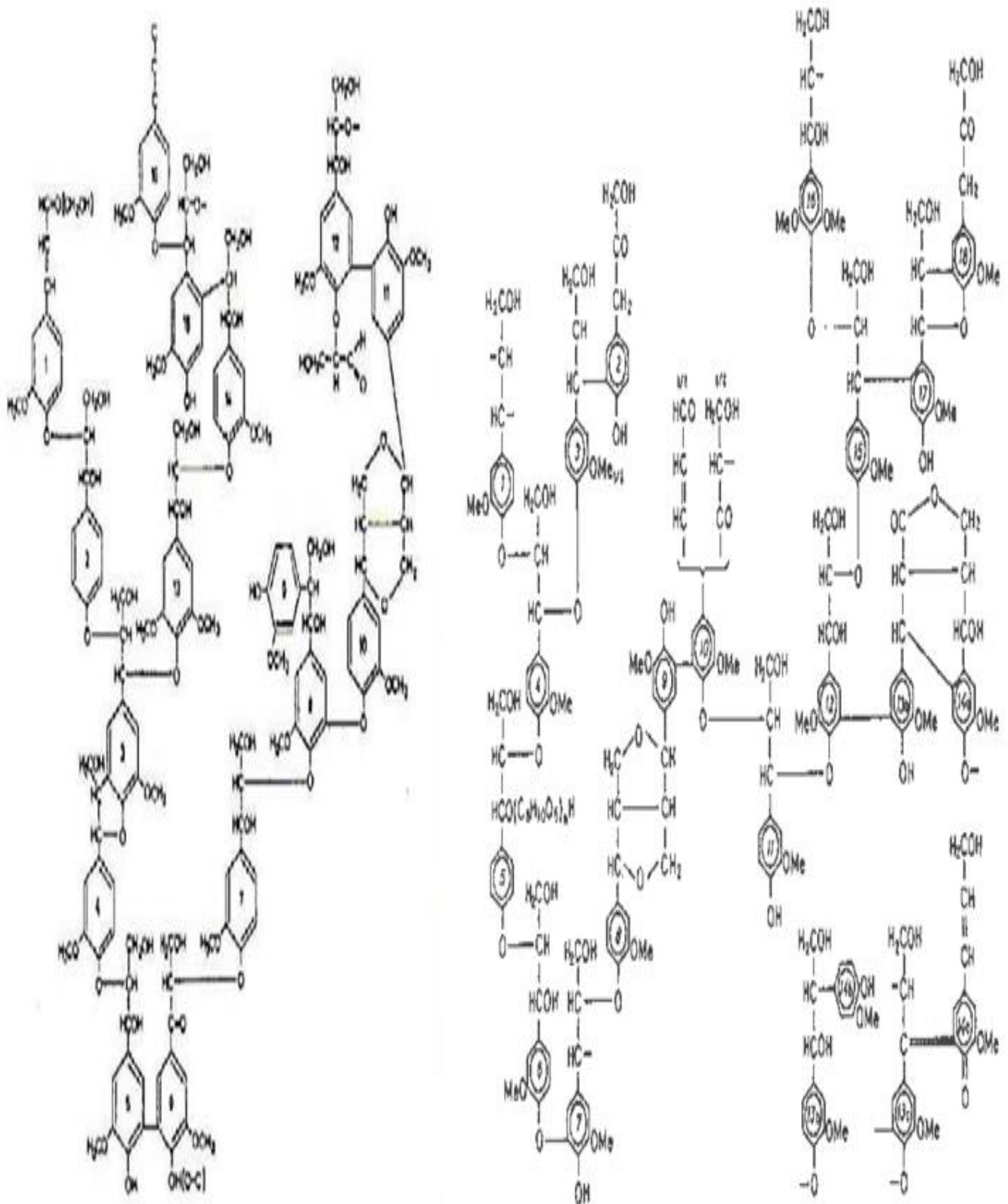


Figure -17- : Structure de la lignine proposée Figure -18- : Structure de la lignine issue d'un fragment

2.2. La cellulose

Cette substance naturelle est la plus abondante produite par tous les organismes vivants ; elle constitue la structure de base des cellules végétales (*environ 40% du carbone organique se retrouve dans la cellulose* [29, 30, 56]).

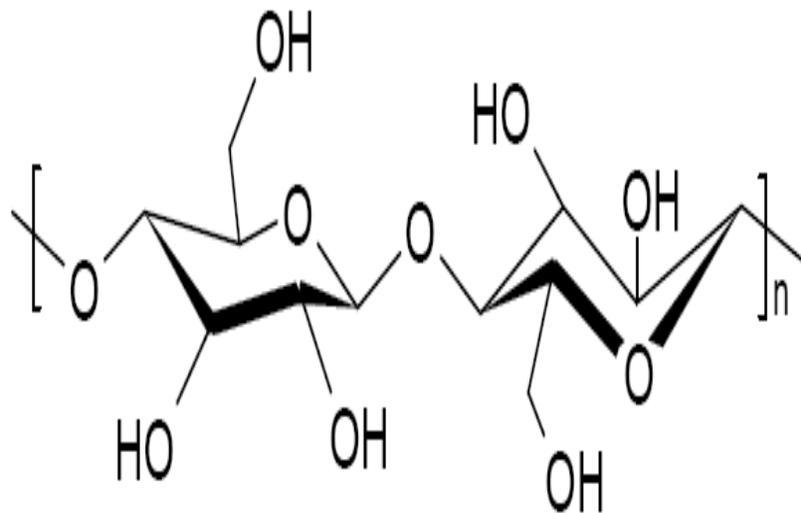


Figure -19- : Structure de la molécule de cellulose.

Elle est constituée d'unités anhydroglucopyranoses *Figure -19-* reliées par des liaisons- β (1.4) glycosidiques pour former une chaîne linéaire appelée polymère β – glucane.

La cellulose peut être sous forme amorphe ou sous forme cristalline. Elle est composée de microfibrilles qui accolées les unes aux autres s'arrangent en fibrilles pour former les parois des trachéides. La structure supramoléculaire précise de la cellulose (intimement liée aux hémicelluloses) n'est pas encore complètement déterminée. Plusieurs modèles existent comme ceux de MARCHESSAULT) [31] ou de MARX-FIGINI [32] mais aucune configuration n'a été déterminée précisément à l'heure actuelle.

2.3. Les hémicelluloses

Représentant 20 % à 30 % de la constitution du bois, les hémicelluloses sont étroitement liées à la cellulose dans les parois cellulaires. Tout comme la lignine, les hémicelluloses sont des molécules complexes et de nature variable (*Figures -20-et -21-*). Différents types d'hémicelluloses peuvent être distinguées : les xylanes, les mannanes (hexosanes), les glucanes, les galactanes et les pectines (acides galacturoniques).

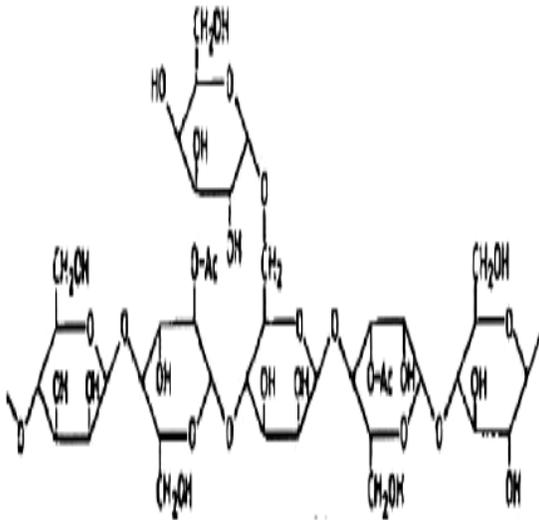


Figure -20- : Structure chimique partielle d'un O-acétyl-galacto-glucomannane chez les conifères

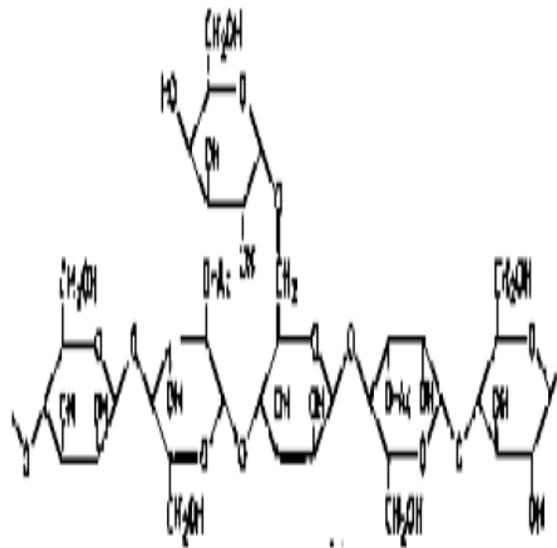


Figure -21- : Structure chimique partielle d'un O-acétyl-4-O-méthyl-gluco-ronoxylane chez les feuillus

Il est admis qu'entre les hémicelluloses et la lignine des liaisons de type esters, éthers ou glucosidiques se forment [29]. La *Figure -22-* présente ces types de liaisons :

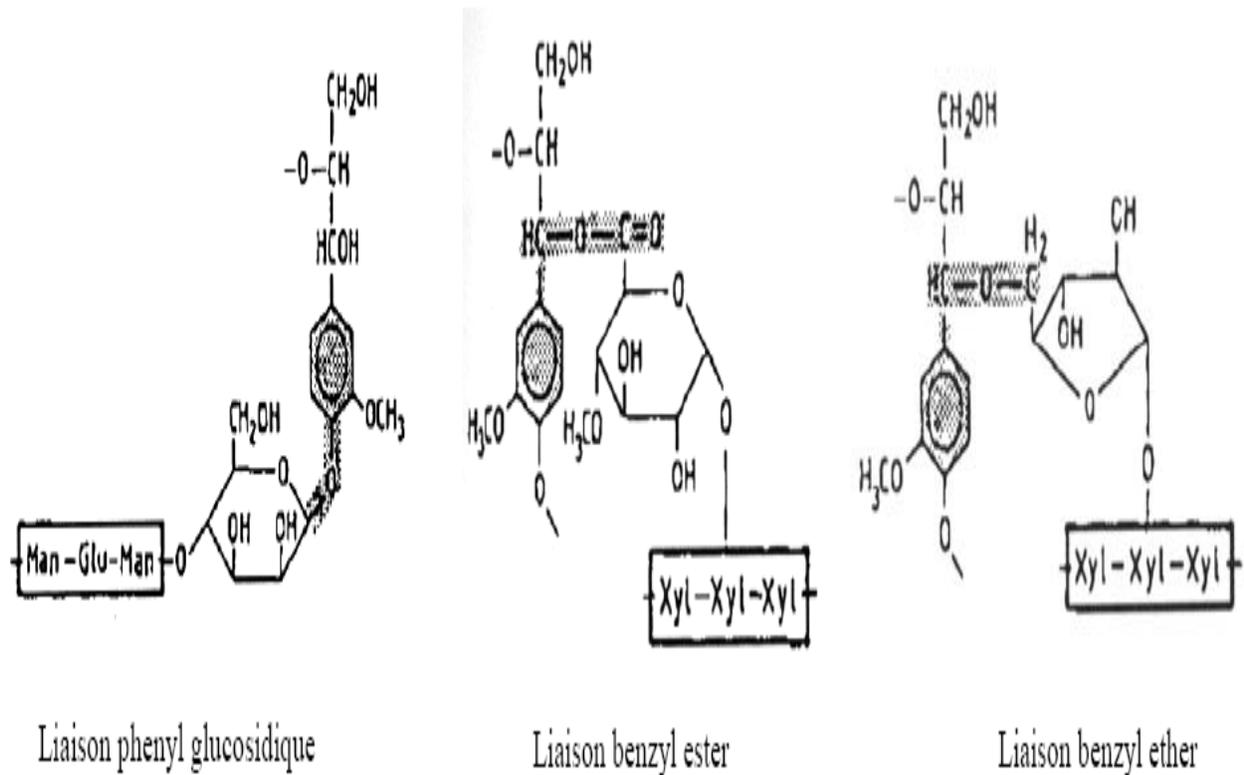


Figure -22- : Types de liaisons possibles entre lignine et polysaccharides [29].

2.4. Les extractibles

Le terme « extrait » recouvre un grand nombre de constituants. Les terpènes (dérivés de l'isoprène), les cires et glycérides (esters d'acides gras, de glycérol et d'alcools à longues chaînes) et enfin, les composés phénoliques tels que les flavonoïdes ou les tanins (que l'on retrouve dans les feuilles sous forme hydrolysables ou condensés). [58]

Bien qu'en faible proportion dans le bois (environ 1 %), les extraits présentent une influence importante sur les propriétés et les qualités de transformation des bois. [59]

2.5. Les inertes

Les matériaux ligno-cellulosiques contiennent des matières minérales qui sont présentes en proportion massique à hauteur de 0,3 à 1 %, avec des teneurs pouvant atteindre 7% pour les essences tropicales [33]. Dans le cas de la valorisation énergétique, ces minéraux constituent ce qu'on appelle couramment les cendres. [60]

La composition des cendres varie en fonction de l'essence et surtout du lieu de croissance de l'arbre. L'analyse de celles-ci donne généralement les résultats suivants (Tableau 5) :

Tableau -5- : Composition des cendres (% massique) [32].

Remarque :

Il est possible de trouver

Des traces de silice, de

Na_2O , FeO , Cl , SO_4^{2-}

<i>COMPOSE</i>	<i>%</i>
<i>K_2O</i>	15 à 40
<i>CaO</i>	12 à 55
<i>MgO</i>	10 à 20
<i>Mn_3O_4</i>	3 à 25
<i>P_2O_5</i>	3 à 16

Liaison phenylglucosidique Liaison benzyl ester Liaison benzyl-ether. Dans la littérature, lorsqu'un matériau est utilisé comme combustible, il est courant de distinguer différents types d'analyses pour le caractériser. L'analyse élémentaire permet de déterminer la composition chimique élémentaire du combustible. Les analyses thermogravimétriques permettent d'en déterminer l'humidité, le taux de volatils, le taux de carbone fixe ainsi que le taux de cendres.

**Chapitre III : Utilisation des
déchets de bois du Pin
d'Alep dans les boues de
forage**

1- Caractérisations des matériaux :

1-1- Introduction :

Les boues à bases des polymères sont considérées comme des boues biodégradables qui ont des propriétés sensibles à une attaque biologique ou micro-organismes [22-25]. Les polymères cités dans le présent rapport sont classés comme des polymères biodégradables comme l'amidon, le xanthane, la gomme de xanthane, la cellulose, etc. Ces dernières sont actuellement, utilisés dans la préparation des boues de forage [23, 26- 28].

1-2- La boue de forage utilisée :

Pour mener cette étude, les boues à base d'eau choisies sont celles actuellement utilisées pour le forage de puits de pétrole dans le sud Algérien. Les produits et les matériaux polymères utilisés pour la formulation des boues de forage à base d'eau sont les suivants : la bentonite, la soude caustique, le carbonate de sodium, le chlorure de potassium, la cellulose poly-anionique (PAC_ul et PAC_R), la carboxy-méthyl-cellulose (CMC) et le Xanthane (XCD). Le tableau 5 donne la composition et les propriétés rhéologiques de la boue à base d'eau utilisée dans ce travail. Ces boues ont été préparées à l'aide d'un matériel API (API RP 13B-1, 2003).

Tableau -6- Formulation de boue pour une densité $d = 1,05$

<i>Produits</i>	<i>Concentration [kg/m³]</i>
<i>La Soude Caustic</i>	1
<i>Le Carbonate De Sodium</i>	0,7
<i>Bentonite</i>	20
<i>PAC_ul</i>	5,7
<i>PAC_R</i>	0,7
<i>CMC LV</i>	6
<i>XCD</i>	0,7
<i>KCL</i>	40
<i>Anti-Mousse</i>	0,5

Tableau -7- caractérisation de boue à base d'eau formulée

<i>Propriétés Rhéologiques</i>		
<i>Vitesse de rotation</i>		PV cps
600	54	16
300	38	AV cps
200	33	27
100	28	Yvlbs/100ft²
6	22	22
3	20	
<i>Gels 10''/10'</i>	21/25	
<i>Filtrate cc/30mn</i>		6

PV : viscosité plastique ; AV: viscosité apparente et Yv: valeur de rendement ou point de rendement

1-3- La poudre de bois utilisée :

Afin d'évaluer l'utilisation de la poudre de bois dans la boue à base d'eau, le bois de pin d'Alep a été utilisé dans ce travail en utilisant ce bois pour remplacer les additifs à base de polymères dans les boues à différentes concentrations et de dimensions différentes. Les coupons de pin d'Alep ont été récupérés des ateliers de fabrication du bois en tant que déchets. La poudre de bois a été introduite par substitution, tout d'abord de PAC_{ul} et CMC, ensuite par substitution de XCD et PAC_R. Cette procédure a été choisie pour voir quel rôle peut jouer la poudre de bois dans le comportement au sein d'une boue de bois.

La structure microscopique du pin d'Alep utilisée dans cette étude, a été obtenue par microscopie électronique à balayage (MEB) et diffraction des rayons X (DRX), cette structure est illustrée sur la *figure -18-*. Selon la figure, cette poudre de bois a une phase cristalline et une phase amorphe. Il est à noter que de nombreuses études ont confirmé la structure du bois de pin d'Alep, car ce type de bois est composé de cellulose, d'hémo-cellulose, de lignine et de quelques oligo-éléments [64]. Ces minéraux sont généralement sous la forme de silice cristobalite (*voir Figure 23 (a)*).

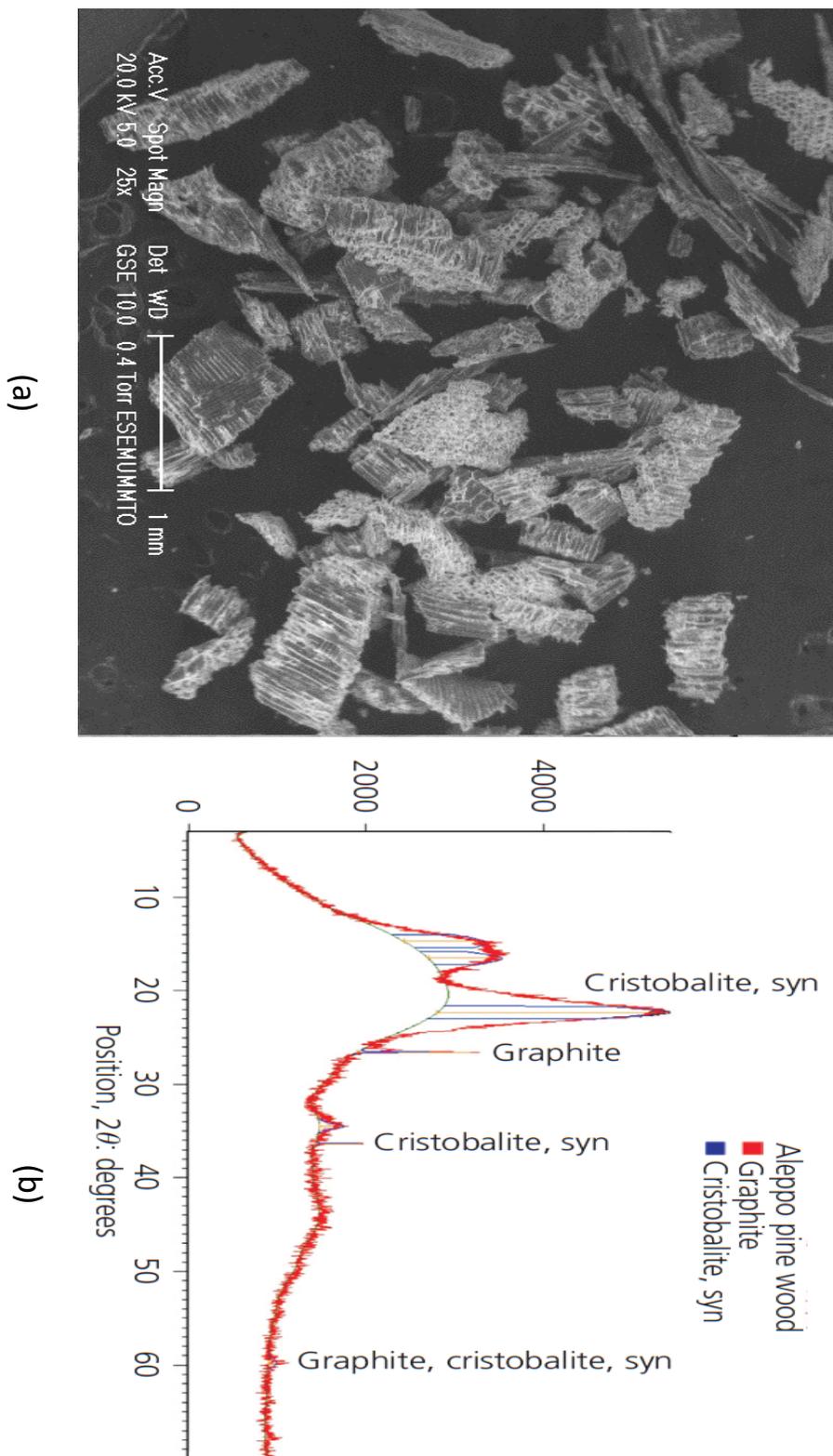


Figure -23 - : Poudre de bois utilisée (déchets de pin d'Alep) (a) SEM (b) XRD

1-4- Méthodes d'essai :

Le comportement rhéologique des boues et les paramètres ont été déterminés par des tests rhéologiques. Un rhéomètre *fann 35* à vitesse variable (3 à 600 tr / min) a été utilisé pour réaliser les tests rhéologiques. Un viscosimètre donnant des valeurs en centi-poise (cP) ou en méga-Pascal en seconde (mPa.s), en utilisant les formules connues des pratiques recommandées par l'API pour les essais sur le terrain de fluides de forage. Ce sont des équations habituellement utilisées sur le site et également utilisées par de nombreux auteurs. Le filtrat API et le gel 0/10 (lecture du cadran à 3 tours par minute (tpm) après mélange et au bout de 10 min) sont déterminés à l'aide des recommandations API (API RP 13B-1, 2003).

2- Résultats et discussions

2-1- Partie I : Utilisation de déchets de bois en tant que viscosifiant :

Substitution de PAC et CMC par poudre de bois (Pin d'Alep)

2-1-1- Comportement rhéologique :

Les Figures de -24- à -26- montrent le comportement rhéologique des boues à base d'eau ou on a substitué le PAC et le CMC par la poudre de bois à différentes concentrations et de taille de particules différente. Selon les rhéogrammes obtenus, toutes les suspensions présentent un écoulement non newtonien. Cependant, le comportement de ces suspensions peut être identifié en utilisant des modèles rhéologiques connus [61], [62], et [63]. En effet, plusieurs études ont montré que le comportement de ces types de boue suit le modèle de Herschel-Bulkely. Quels que soient la concentration et la taille des particules de bois, le comportement rhéologique du BBE étudiée est identique à celui de Herschel-Bulkely.

La Contrainte de Cisaillement (lbs/100ft²)

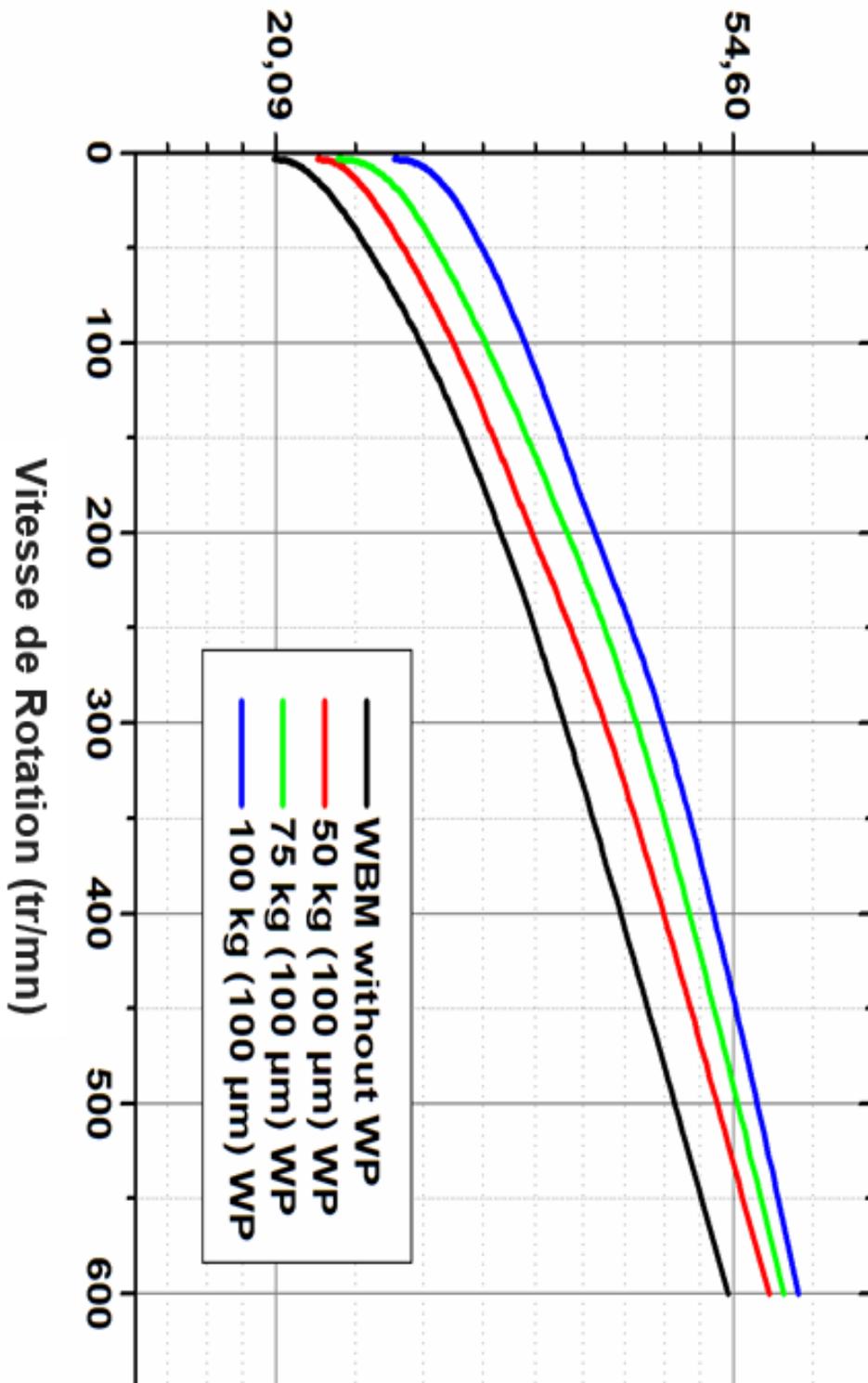


Figure -24- : PAC_ullet et CMC remplacés par la poudre de bois (PBde taille = 100 µm) à différentes concentrations

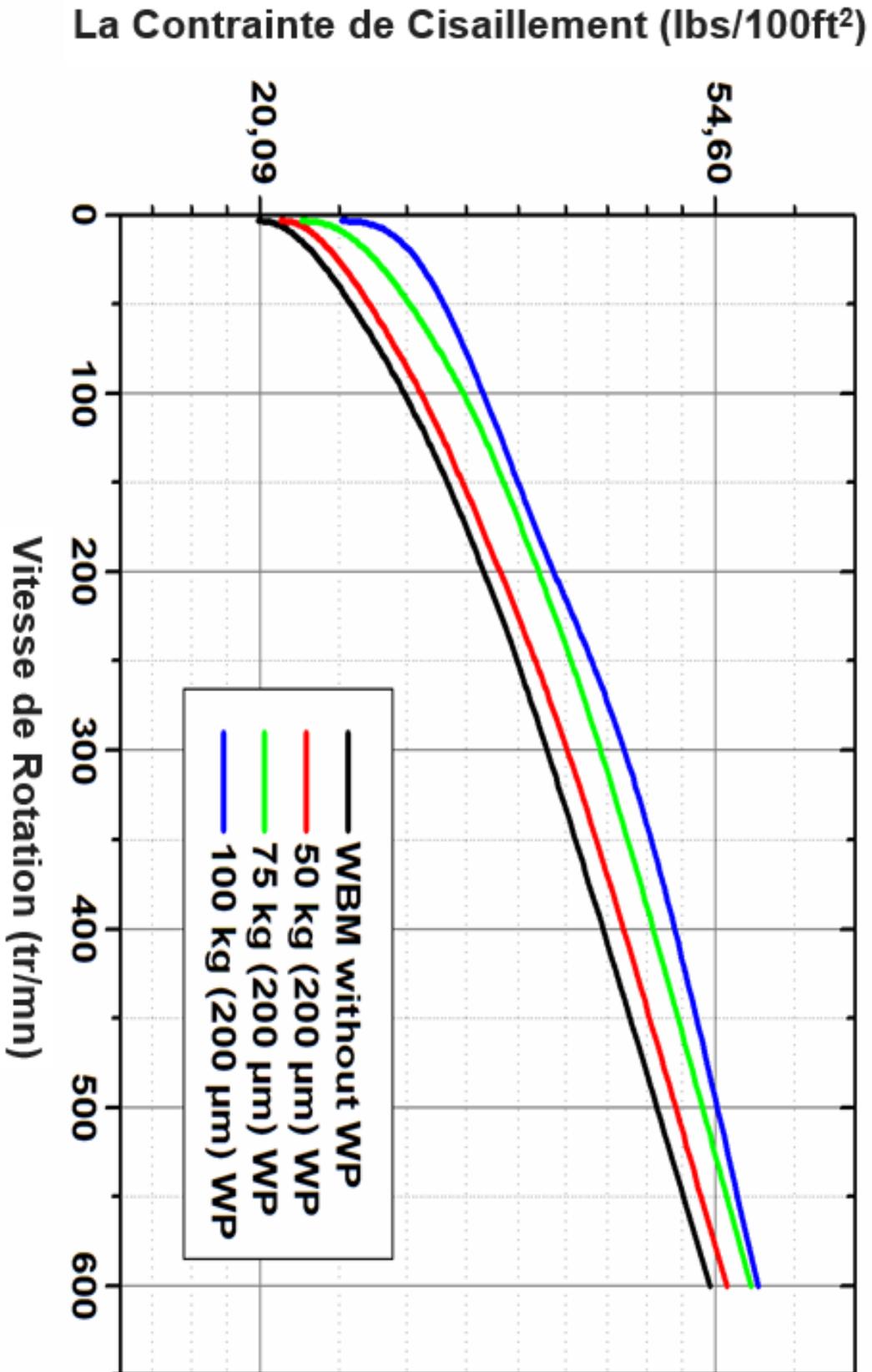


Figure -25- : PAC_ulet CMC remplacés par la poudre de bois (PB de taille = 200 µm) à différentes concentrations

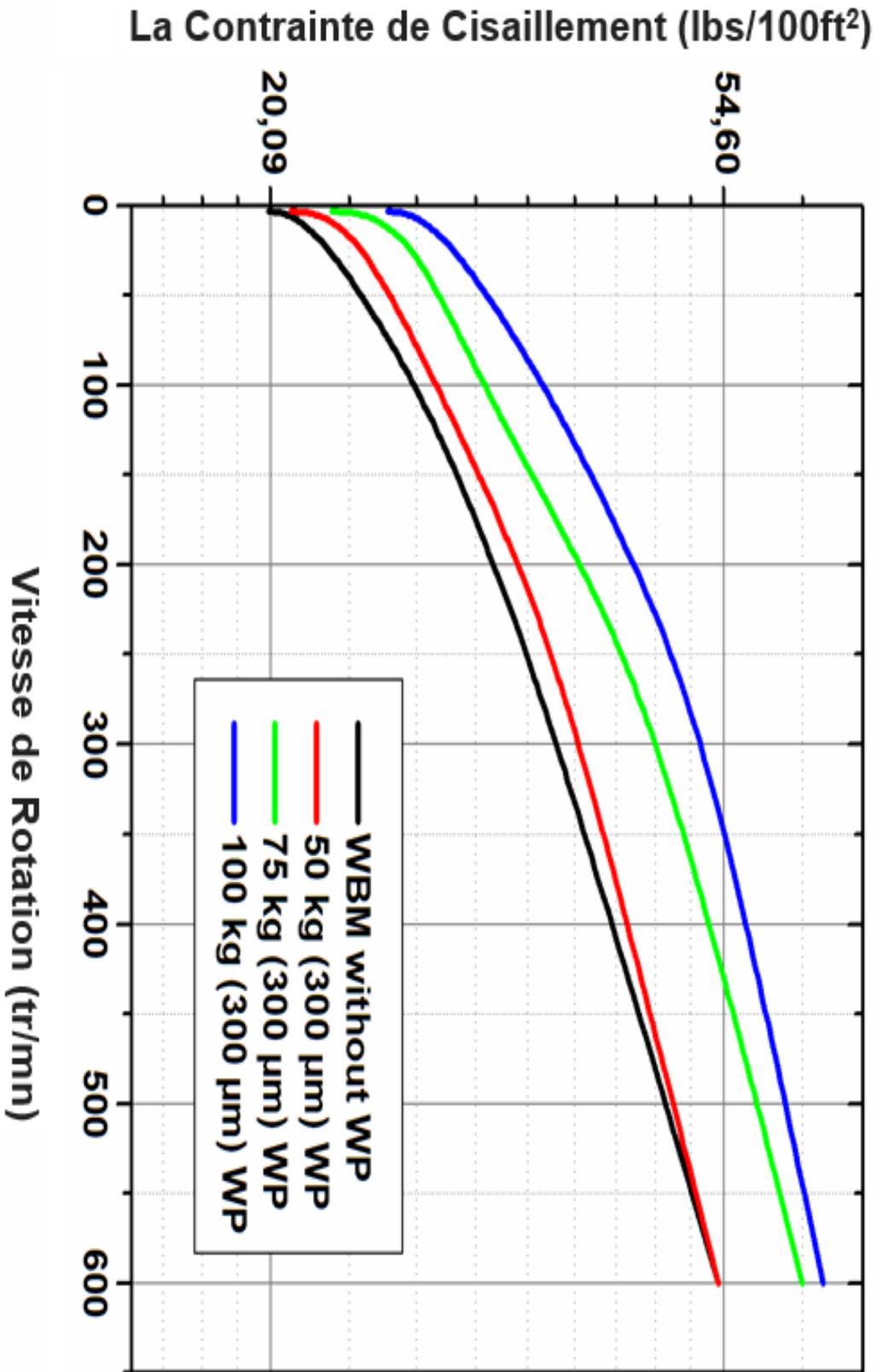


Figure -26- : PAC_ul et CMC remplacés par la poudre de bois (PB de taille = 300 μm) à différentes concentrations

En règle générale, on remarque que les contraintes de cisaillement pour tous les échantillons des boues à base d'eau qui ont été étudié montrent une augmentation de la contrainte de cisaillement au fur et à mesure que la concentration en poudre de bois augmente, et cela pour toutes les tailles de particules de la poudre de bois.

On remarque qu'elle est de l'ordre de 20.09 (lbs/100ft²) pour une boue à base d'eau sans ajout de la poudre de bois, et elle est la même pour les différentes tailles de particule de la poudre de bois au démarrage des essais. Puis elle augmente avec l'augmentation de la concentration en poudre de bois jusqu'à environ 25 (lbs/100ft²) pour une concentration de 100 Kg/m³.

En faisant augmenter la vitesse de rotation, on remarque que la valeur de la contrainte de cisaillement est proportionnelle à cette augmentation. Pour une boue sans poudre de bois, la valeur de la contrainte va de 20.09 (lbs/100ft²) jusqu'à 54.60 (lbs/100ft²). Pour la concentration en poudre de bois la plus élevée (à 100 kg/ m³) elle varie de 25 (lbs/100ft²) à 61(lbs/100ft²).

En outre, l'effet d'ajout de poudre de bois entraîne une augmentation de Yield point des boues à base d'eau à des concentrations de 0 à 100 kg/m³ puis une diminution pour des boues à base d'eau plus concentrées, ensuite il se stabilise au-delà de cette concentration.

Il est à noter qu'avec une substitution du PAC et du CMC par 100 kg/m³ de poudre de bois, le Yield point augmente de 22 (lbs/100ft²) pour une boue à base d'eau sans ajout de poudre de bois, à 29 (lbs/100ft²) ; puis il diminue jusqu'à 27.2 (lbs/100ft²), et enfin se stabilise autour de 26 (lbs/100ft²) pour une concentration au-delà d'une concentration de 300 Kg/m³. Cependant, on remarque que la valeur de la viscosité plastique diminue avec l'augmentation de la concentration en poudre de bois. La viscosité plastique est de 20 cP pour une boue à base d'eau sans ajout de la poudre de bois, puis elle diminue jusqu'à 13 cP. Cela veut dire que cette poudre de bois peut être utilisée comme agent viscosifiant (en remplaçant les polymères synthétiques) puisqu'elle a un effet viscosifiant.

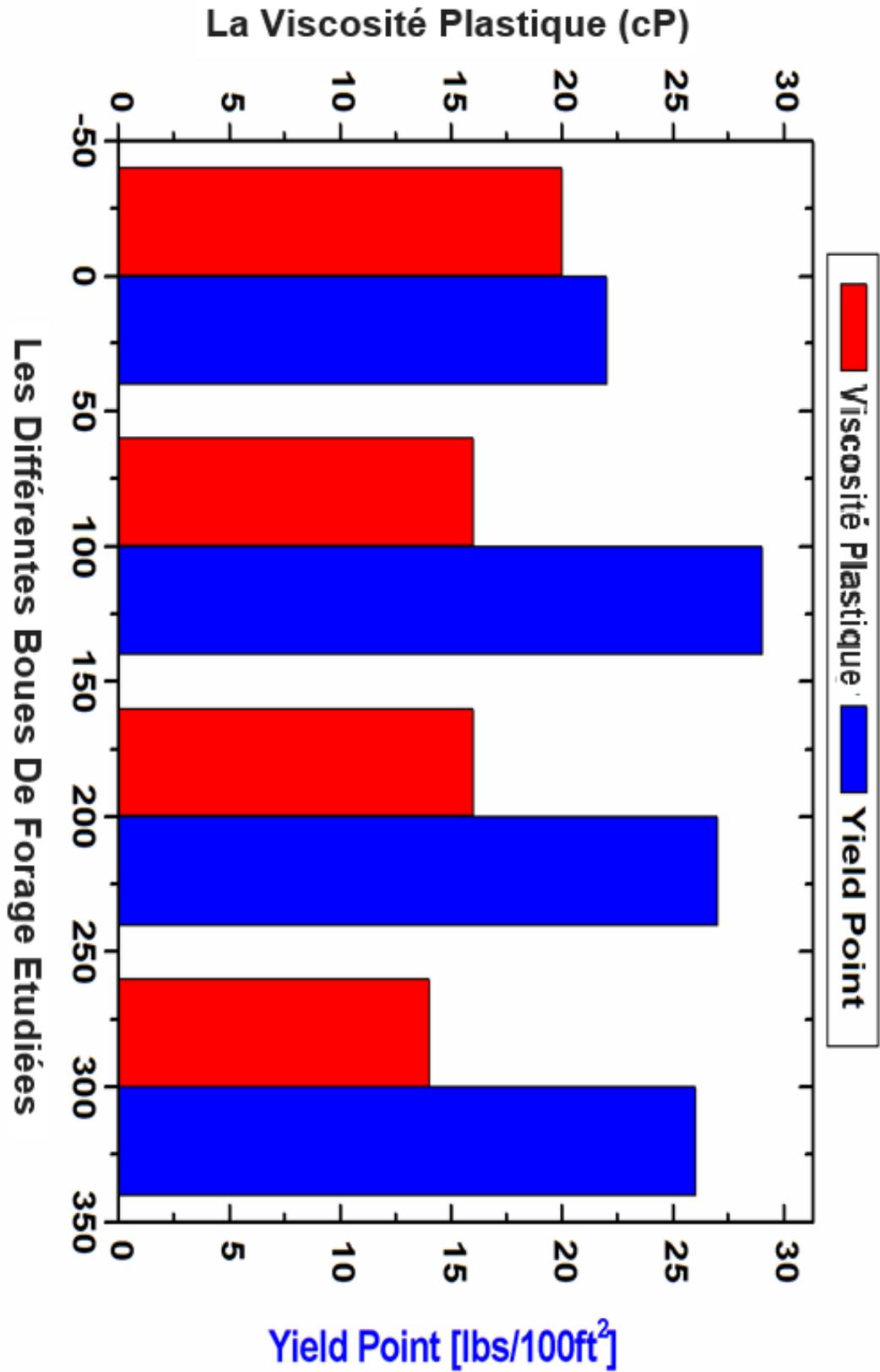


Figure -27 - : substitution du PAC_ul et CMC par la poudre de bois

2-2- Partie II : Utilisation de déchets de bois en tant qu'agent réducteur de filtrat : Substitution XCD et PAC_R par poudre de bois (Pin d'Alep)

2-2-1- Comportement rhéologique :

Le comportement rhéologique des boues à base d'eau où le polymère XCD et PAC_R sont substitués par la poudre de bois à différentes concentrations et différentes tailles de particules est représenté sur les Figures -28- à -30-. Selon ces résultats et selon les rhéogrammes obtenus, toutes les suspensions présentent un écoulement non newtonien, comme le premier cas, et ce comportement des suspensions peut être identifié en utilisant des modèles rhéologiques connus. En effet, selon des études qui ont été muni sur des suspensions pareilles, le comportement de ces types de boue suit le modèle de Herschel-Bulkely, quelque soient la concentration et la taille des particules de la poudre de bois. [61], [62].

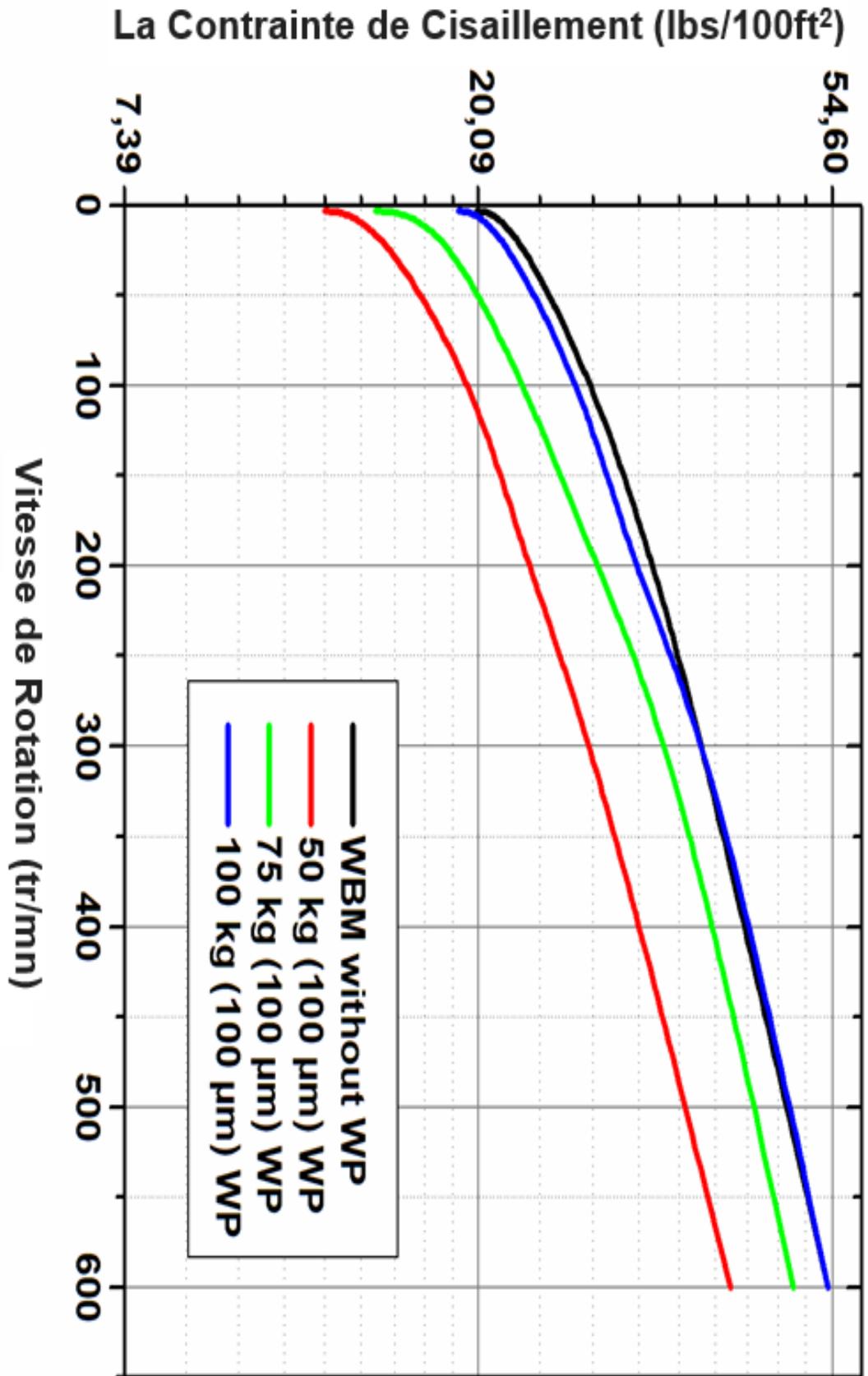


Figure -28 : XCD et PAC_R remplacés par de la poudre de bois (WP de taille = 100µm) à un contenu différent

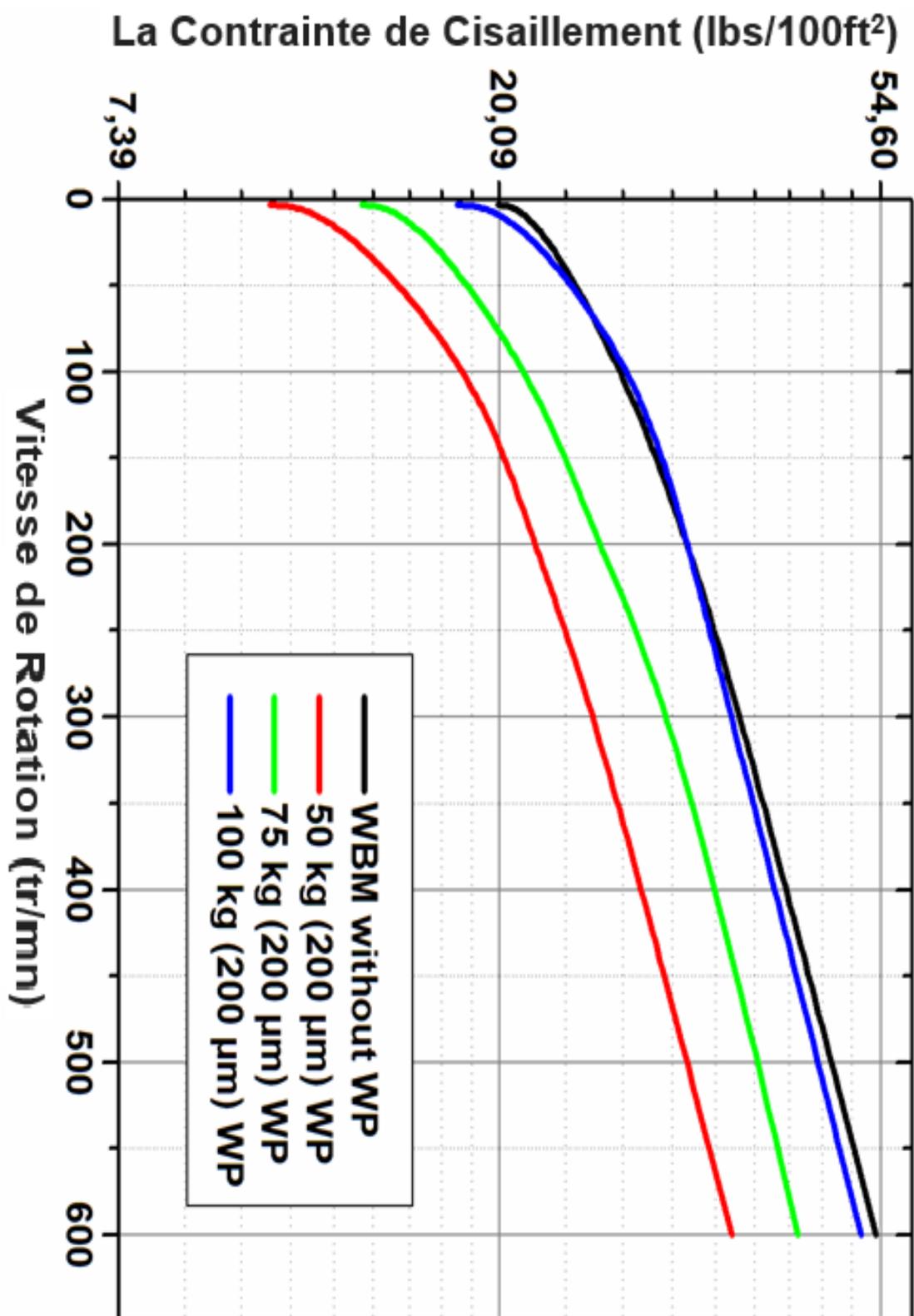


Figure -29- : XCD et PAC_R remplacés par de la poudre de bois (WP de taille = 200µm) à un contenu différent

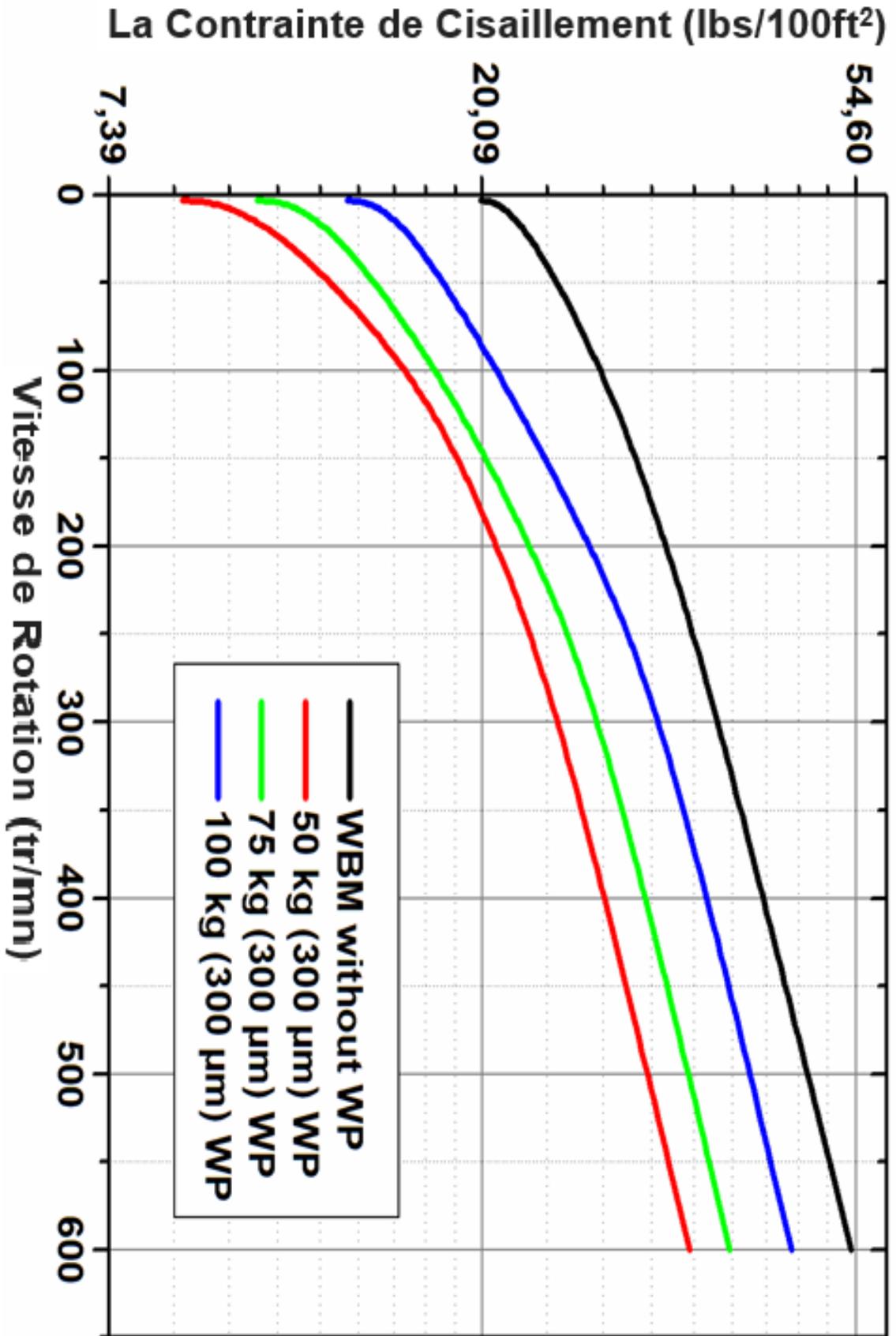


Figure -30- : XCD et PAC_R remplacés par de la poudre de bois (WP de taille = 300µm) à un contenu différent

On constate que la contrainte de cisaillement diminue considérablement en ajoutant la poudre de bois, puis elle a tendance à augmenter avec l'augmentation de la teneur en poudre de bois pour tous les échantillons à différentes concentrations, et cela pour les différentes tailles des particules de la poudre de bois.

Le graphe de la contrainte de cisaillement des boues où on a ajouté de la poudre de bois de taille de 100 et 200 μm à une concentration de 100 kg/m^3 , est superposé à celui d'une boue sans ajout de la poudre de bois, et ce n'est pas le cas pour la taille des particules de 300 μm .

La contrainte de cisaillement pour une boue avec de la poudre de bois à 100 kg/m^3 augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation de 20.09 ($\text{lbs}/100\text{ft}^2$)

Il est à noter que la valeur du Yield point augmente de 22 $\text{lbs}/100 \text{ft}^2$ pour une boue sans ajout de poudre de bois jusqu'au 25 $\text{lbs}/100 \text{ft}^2$ pour une addition de poudre de bois avec des tailles de particules de 100 μm puis elle diminue pour des tailles plus grandes (200 μm et 300 μm) jusqu'au 17 $\text{lbs}/100 \text{ft}^2$.

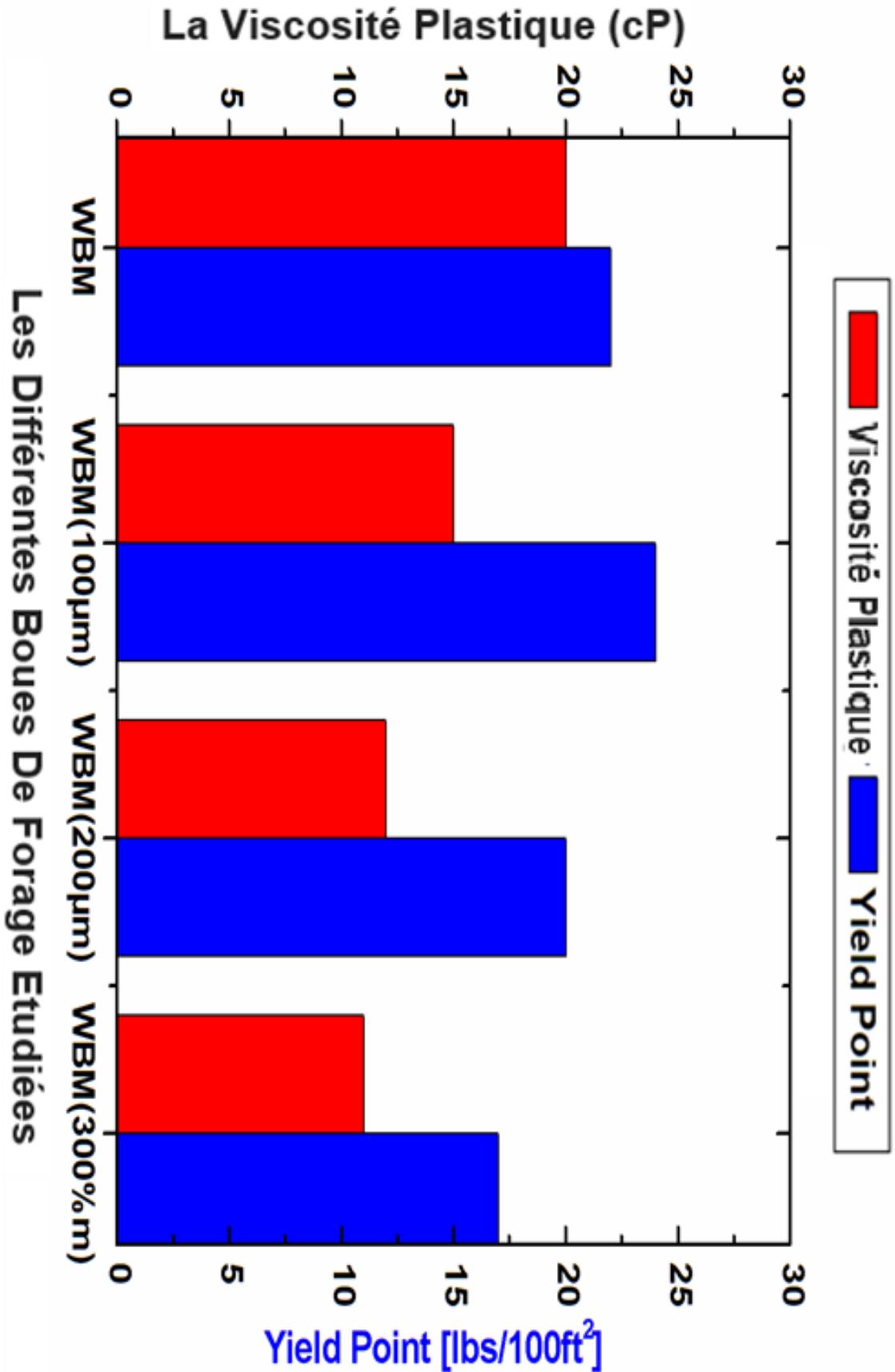


Figure -31- : substitution de XCD et PAC_R par la poudre de bois

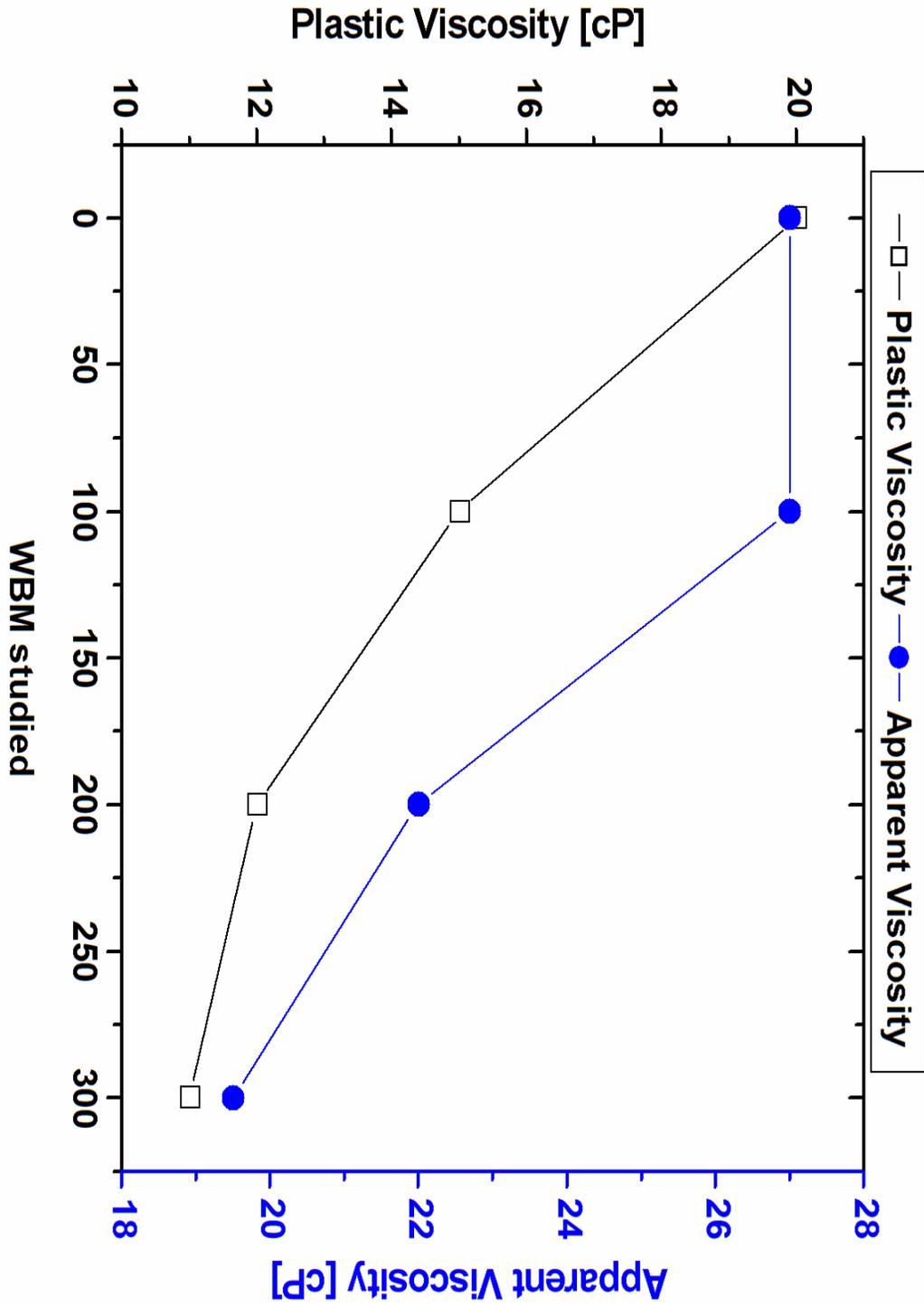


Figure -32- : substitution de XCD et PAC_R par la poudre de bois

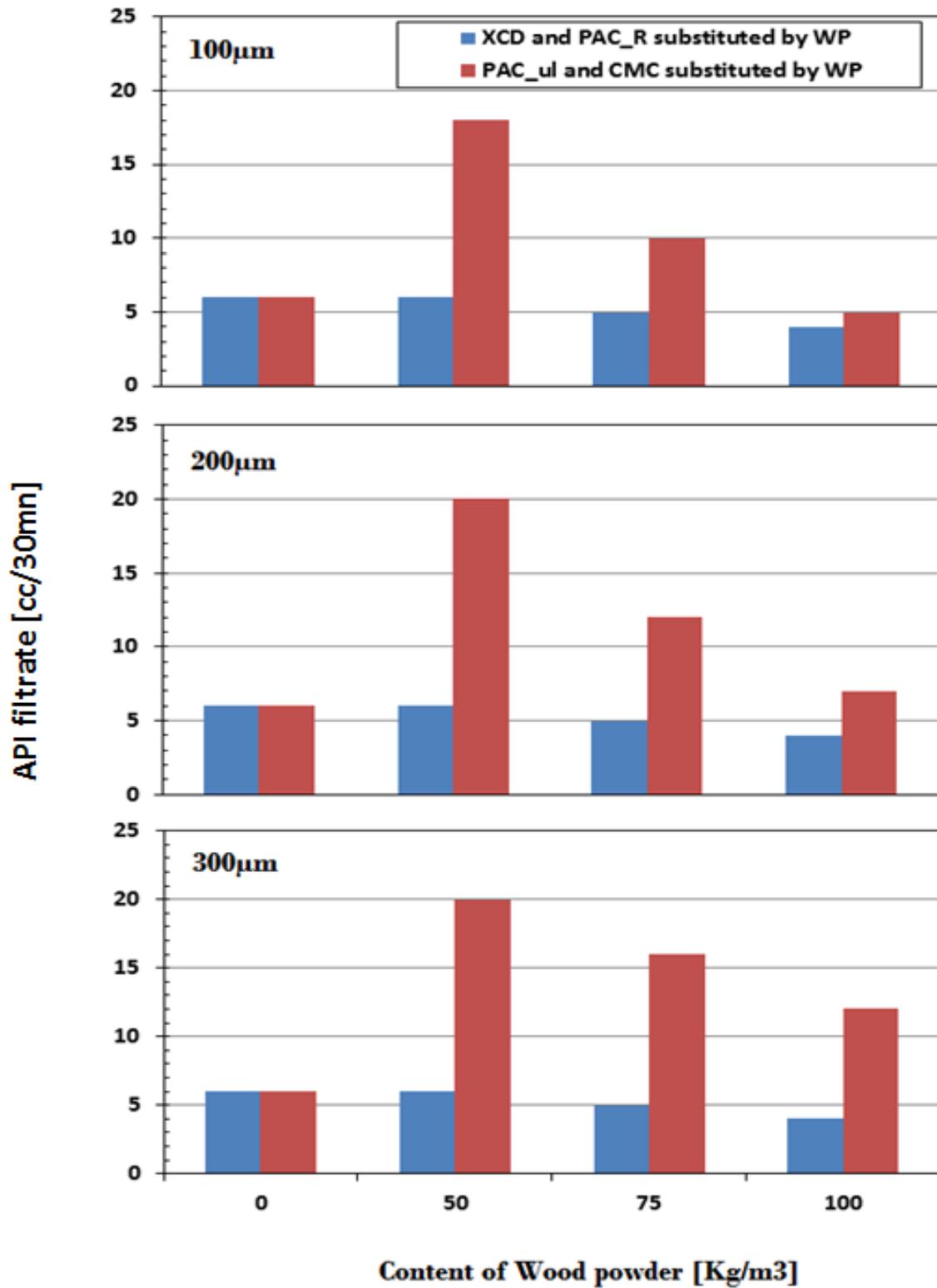


Figure -33- : le filtrat Api en fonction de différente boues à différentes concentration et taille de particules de la poudre de bois

Cependant, l'effet d'ajout de la poudre de bois provoque une diminution de la viscosité plastique de 20 cP jusqu'au 12 cP en fonction d'augmentation de la taille des particules, la viscosité apparente reste constante à environ 27 cP pour la boue sans ajout de la poudre de bois et celle avec une poudre de bois de taille des particules 100 μm , puis elle diminue jusqu'au 19.5 cP pour une boue avec des particules de taille de 300 μm .

La quantité de filtrat contenue dans les échantillons où XCD et PAC-R ont été substitués par la poudre de bois dont la taille des particules est de 100 μm diminue en fonction de la quantité de poudre de bois ajoutée, de 6 cc/30 mn pour une boue sans ajout de poudre de bois jusqu'à 3 cc/30mn.

Tandis que la quantité de filtrat pour les échantillons pour lesquels les PAC-ul et CMC ont été remplacé par la poudre de bois de différentes tailles des particules, est plus importante en comparant avec celle pour laquelle XCD et PAC-R ont été substitués par la poudre de bois pour la même taille de particules. On remarque une diminution de la quantité du filtrat au fur et à mesure que la concentration de la poudre de bois augmente de 18 cc/30 min dans les échantillons ayant une concentration de 50 kg/m^3 jusqu'à 5 cc/30 mn pour les échantillons ayant une concentration de 100 kg/m^3 . La quantité de filtrat contenue dans les échantillons pour lesquels les PAC-ul et CMC ont été remplacé par la poudre de bois de taille de 100 μm (elle est de 18 cP) est faible par rapport à celle de 200 μm et 300 μm (20 cP), puis les quantités de filtrat diminue avec l'augmentation de la concentration, mais reste celle de l'échantillon contenant des particules de taille de 100 μm la plus faible en comparant avec celles des échantillons de 200 μm et 300 μm .

En comparant, la quantité de filtrat obtenue pour différentes tailles de poudre de bois on remarque que, pour la substitution de XCD et de PAC-R par la poudre de bois, elle est minimale que celle où on a substitué le PAC-ul et le CMC par la poudre de bois.

**Chapitre IV : Utilisation des
déchets de bois d'une
boiserie dans les boues de
forage**

1- Introduction : Dans cette deuxième partie d'étude, des formulations des boues ont été élaborées afin d'évaluer l'effet des déchets de différents types de bois d'une boiserie sur les comportements rhéologiques des boues de forage à base d'eau.

2- La boue de forage utilisée

Les boues étudiées dans notre travail, ont été choisies selon les systèmes de boue utilisés pour le forage des puits du pétrole au sud d'Algérie (BASP). Pour cela, la méthodologie suivit et les différentes caractéristiques du constituant utilisé dans les formulations des boues la bentonite, la soude caustique, le carbonate de sodium, le chlorure de potassium, la cellulose poly-anionique (PAC_L), le Barazan. Le tableau 8, et 9 donnent la composition et les propriétés rhéologiques de la boue à base d'eau utilisée dans ce travail. Ces boues ont été préparées à l'aide d'un matériel API (API RP 13B-1, 2003). Il est nécessaire pour un travail de recherche de réaliser et de déterminer les caractéristiques de ces matériaux.

Tableau -8- : Formulation de boue avec le Barazan pour une densité $d = 1, 20$

<i>Produits</i>	<i>Concentration [kg/m³]</i>
<i>La Soude Caustic</i>	<i>1,5</i>
<i>Le Carbonate De Sodium</i>	<i>0,7</i>
<i>Bentonite</i>	<i>20</i>
<i>Barite</i>	<i>220,37</i>
<i>Eau</i>	<i>0,92 (m³/m³)</i>
<i>Barazan</i>	<i>0,70</i>
<i>KCL</i>	<i>40</i>
<i>Anti-Mousse</i>	<i>Quelques gouttes</i>

Tableau -9- : Formulation de boue avec le Pac-L pour une densité $d = 1, 20$

<i>Produits</i>	<i>Concentration [kg/m³]</i>
<i>La Soude Caustic</i>	<i>1,5</i>
<i>Le Carbonate De Sodium</i>	<i>0,7</i>
<i>Bentonite</i>	<i>20</i>
<i>Barite</i>	<i>217,89</i>
<i>Eau</i>	<i>0,91 (m³/m³)</i>
<i>Pac-L</i>	<i>5,70</i>
<i>KCL</i>	<i>40</i>
<i>Anti-Mousse</i>	<i>Quelques gouttes</i>

3- Méthodes d'essai :

Pour réaliser notre travail, nous avons procédé à la méthodologie suivante :

- Caractérisation des matériaux utilisés (Bentonite, PAC-L, Dextrid, Barazan et autres additifs)
- Formulation de la boue à base d'eau couramment utilisée ;
- Formulation des boues ; à différents dosages et tailles des déchets : en tant que viscosifiant par substitution des polymères ;

Effets des déchets de bois sur les paramètres rhéologiques, les paramètres physico-chimiques, le comportement rhéologique des boues étudiées, ainsi que l'étude de filtrat API;

4- Caractérisation des matériaux :

4-1- La bentonite :

Les caractéristiques sont regroupées dans le **tableau 10**

Tableau 10 : Caractéristiques de la bentonite.

Paramètres	Exigences de la norme API
Teneur en humidité	10% maximum
Lecteur à 600 tr/mn	22 min
Yv (lb/100ft ²)	3×Vp max.
Filtrat (ml)	15 ml max.
pH	9,5 max

4-1-a- Composition chimique :

Les compositions chimiques sont regroupées dans le **tableau 11**

Tableau 11 : composition chimique de la bentonite.

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	PAF/520°C
%	55-65	12-19	1-3,4	1-3	0,5-1,8	2-3,4	1-2	0,20	8,20

4-2- Le Barazan : Le bio polymère de xanthane Barazan D à dispersion améliorée aide à fournir une viscosité et une suspension fraîches eau, eau de mer, bromure de sodium, bromure de potassium, chlorure de potassium et chlorure de sodium fluides.

4-2-a- Applications : Le Barazan est principalement utilisé dans les boues pour contrôler la perte de fluide et à produire un gâteau de filtration fin, il Viscosifie l'eau douce et les fluides à base de

saumure utilisés pour le forage, le broyage, le délestage, et les opérations d'emballage de gravier. Le Barazan suspendre les agents de pontage et les matériaux de pondération dans les systèmes d'eau douce et de saumure.

4-2-b- Avantages :

- Aide à se disperser facilement dans les boues d'eau douce et les saumure.
- Aide à fournir des propriétés thixotropes et des caractéristiques d'écoulement non newtoniennes sur une large plage de salinité à des faibles concentrations.
- Aide à fournir une excellente suspension sans avoir besoin d'argile.
- Stable à 250°F (121°C).
- Aide à minimiser le potentiel de dommages à la formulation.

4-3- Le PAC : Polypac poly-anionique cellulose est une grande qualité, soluble dans l'eau polymère conçue pour contrôler la perte de liquide et augmente la viscosité dans des boues à base d'eau.

4-3-a- Applications : Polypac contrôle la perte de liquide dans l'eau douce, l'eau de mer, KCL et les boues salées forme une mince, résistance et à faible gâteau de filtration de la perméabilité qui minimise le risque différentiel et l'invasion de filtrat de solides de la boue. Polypac résiste aux attaques bactériennes-Rial, éliminant le besoin de biocides ou conservateurs. Il est efficace à de faibles concentrations avec le traitement normal de perte de fluide allant à 0,71 à 2,85 kg/m³, (0,25 à 1 lb/bbl). Polypac développe également une viscosité à un degré qui dépend de la concentration de 1,90 kg/m³ (0,67 lb /bbl) va produire une boue à l'eau douce 15 CP de viscosité sans supplément des solides, 2,86kg/m³ (1,0 lb/bbl) de PAC-L va produire aussi un 15CP de viscosité dans un chlorure de sodium saturé. Le PAC-L est un polymère anionique qui va s'attacher et encapsuler schistes et déblais de forage exposée. Ce polymère de protection "enveloppe" et inhibe la dispersion de schiste découpées permet de limiter les interactions fluides avec des schistes exposés.

4-3-b- Avantages :

- Contrôle des pertes des fluides.
- Assure la viscosité convenable.
- Efficace à de faibles concentrations pour contrôler la perte de fluide, et bâtiment viscosité.
- Encapsule les particules de schiste inhibé l'enflure et la dispersion.
- Résiste à l'attaque bactérienne, nécessite pas de biocides ou préservatifs.
- Fonction sur une large gamme de niveaux de salinité, la dureté et le Ph.

- Applicable à toutes les boues à base d'eau, allant de faible teneur en solides, non dispersé systèmes polymères à haute densité et les systèmes dispersés.
- Compatible avec tous les additifs de boue.
- No toxique.

4-4- Dextrid : L'amidon de pomme de terre modifié par DEXTRID LTE aide à contrôler la filtration avec une accumulation de viscosité minimale dans les fluides de forage à base d'eau. Grâce à son mécanisme de revêtement, l'agent DEXTRID LTE aide à réduire dispersion des particules d'argile et stabilise les formations réactives. L'agent DEXTRID LTE est stable contre dégradation bactérienne.

4-4-a- Applications : Le DEXTRID est utilisé pour le contrôle la filtration avec une accumulation de viscosité minimale dans les fluides de forage à base d'eau. Le DEXTRID contribue à réduire les taux de filtration dans la plupart des systèmes de fluides de forage à base d'eau, il aide à améliorer la stabilité du forage. Le DEXTRID aide à floculer les déblais de forage dispersés dans les forages d'eau claire.

4-4-b- Avantages :

- Aide à maintenir le contrôle de la filtration sans augmentation nuisible de la viscosité
- Efficace avec les systèmes de forage rapide non dispersés
- Aide à diminuer la dispersion de l'argile

4-5- BAROID : L'agent de pondération BAROID, sulfate de baryum broyé, satisfait à la spécification API 13A, section 2, pour fluide de forage barytine. BAROID agent de pondération peut être utilisé pour augmenter les densités de pétrole et à base de pétrole fluides de forage à base d'eau à 21 lb / gal (2516 kg / m³).

4-5-a- Applications : Le BAROID est utilisé pour augmenter la densité de pétrole,

- Aide à augmenter la densité de boue jusqu'à 21 lb / gal (2516 kg / m³) .
- Aide à contrôler les pressions de formation
- Aide à stabiliser le forage
- Aide à préparer des bouchons chargés de solides pour les applications de contrôle de puits

4-5-b- Avantages :

- Est l'agent de pondération standard de l'industrie pour les fluides de forage
- Est chimiquement inerte
- Agent de pondération rentable

Tableau 12 : propriétés physiques des polymères utilisés dans la formulation des boues

Produits	Propriétés physiques			
	Apparence physique	Densité	pH, (solution aqueuse à 1%)	Gravité spécifique
Barazan	Poudre jaune à blanche	1,6	6,3	-
PAC	Poudre blanche à beige	641 à 881 kg/m ³	7,75	-
Dextrid	Poudre fine ou granulée.	-	-	1.5.
BAROID	Poudre.	-	-	minimum 4,2.

5- La poudre de bois utilisée :

Afin d'évaluer l'utilisation de la poudre de bois dans la boue de forage à base d'eau, les déchets d'une boiserie ont été choisis pour être utilisés dans cette deuxième partie du travail, ces déchets de bois différents (tous types de bois) ont été utilisés pour remplacer les additifs à base de polymères synthétiques dans les boues à différentes concentrations et de dimensions différentes. Les déchets de bois ont été récupérés des ateliers de fabrication du bois tamisés et séparés par dimensions de particules. La poudre de bois a été introduite par substitution, tout d'abord de PAC_L, ensuite de BARAZAN, et enfin de tous les polymères. Cette procédure a été choisie pour voir si tous les types de bois peuvent jouer le même rôle dans les boues de forage en étudiant leur comportement au sein de la boue.

L'analyse granulométrique des déchets de bois ont montrés les spectres illustrés sur la figure 34

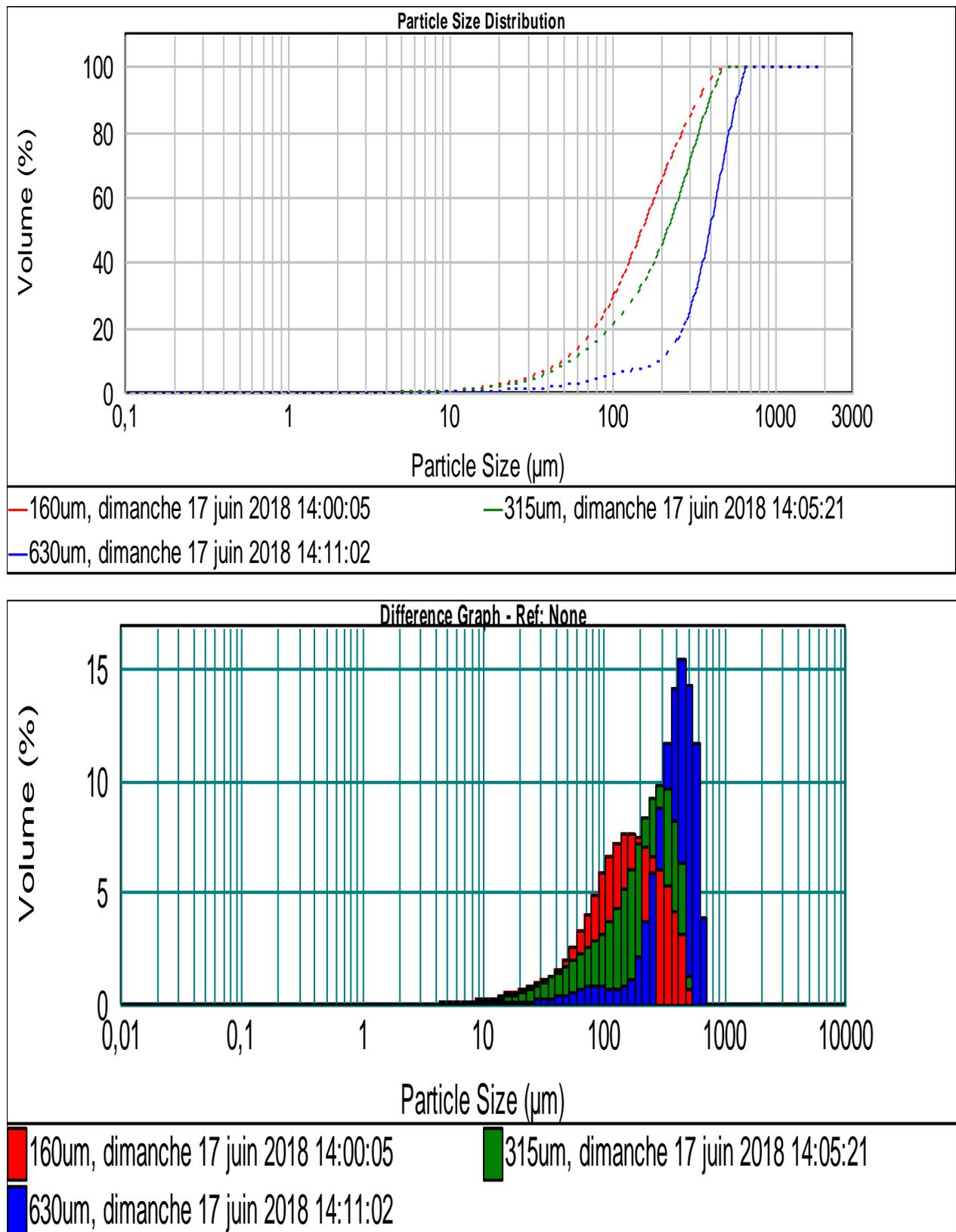


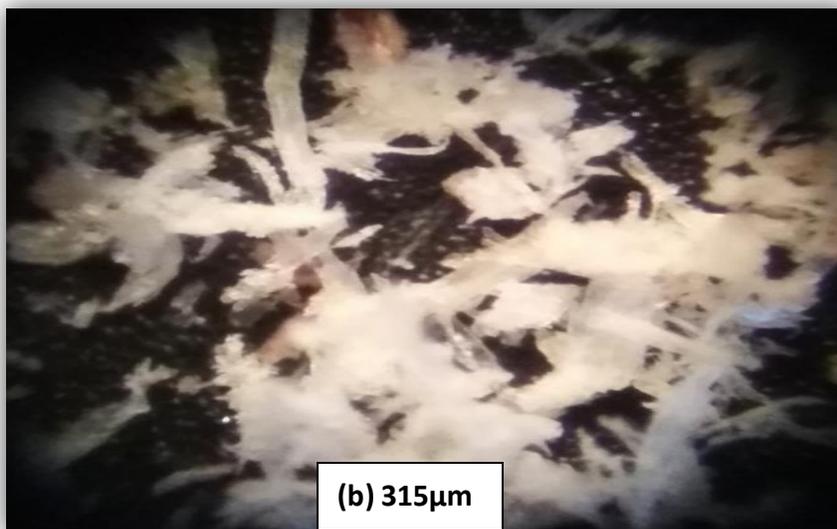
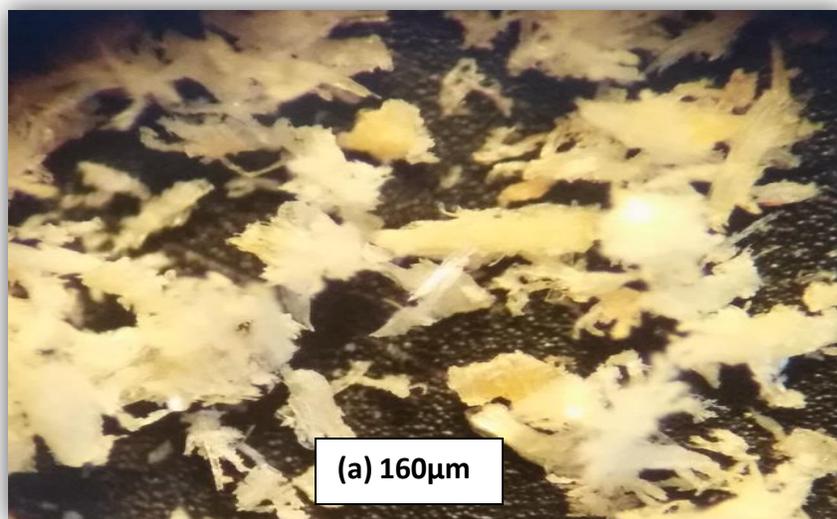
Figure -34- : Distribution granulométrique par granulomètre Laser du bois

Tableau 13 : Les surfaces spécifications de la poudre de bois

Tailles μm	Surface spécifique m^2/g
160	0,0634
315	0,0524
630	0,0238

5-1- L'analyses par microscope optique à donner les photos suivantes :

Dans la figure suivante nous avons analysé la poudre de bois à différentes tailles de particules sous un microscope optique



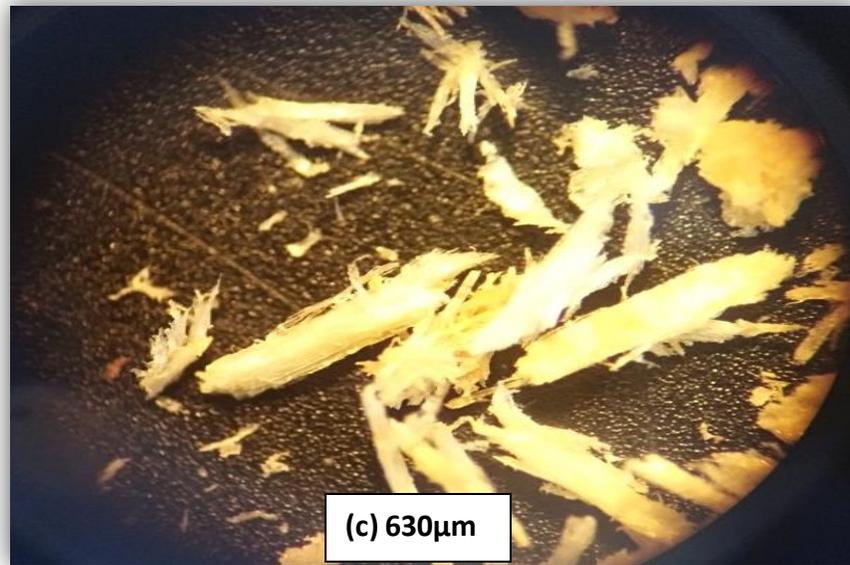


Figure -35- : Images obtenues par microscope optique de poudre de bois



Figure -36- : Dispositif de préparation des boues



Figure -37- : Dispositif de mesure du Filtrat API



Figure -38- : Appareil de mesure de la viscosité plastique

6- Partie I : Utilisation de la poudre de bois en tant que viscosifiant ou réducteur de filtrat par substitution de PAC-L ou le Barazan par la poudre de bois

6-1- Avant Hot Rolling

Tableau -14-

<i>Taille de particules</i>	<i>Concentration</i>	<i>PV</i>	<i>YP</i>	<i>Densité</i>	<i>Ph</i>	<i>Filtrat API (ml)</i>
		<i>(cP)</i>				
160 μm	<i>50 g/l avec Pac-L</i>	18	9	1,22	9	<i>incontrôlable >50 ml</i>
	<i>100 g/l avec Pac-L</i>	56	33	1,22	9	6
	<i>50 g/l avec Barazan</i>	12	4	1,22	9	-
	<i>100 g/l avec Barazan</i>	24	8	1,22	9	<i>incontrôlable >50 ml</i>
315 μm	<i>50 g/l avec Pac-L</i>	13	4	1,21	9	-
	<i>100 g/l avec Pac-L</i>	38	12	1,21	9	7
	<i>50 g/l avec Barazan</i>	12	2	1,21	9	-
	<i>100 g/l avec Barazan</i>	31	11	1,21	9	<i>incontrôlable >50 ml</i>
630 μm	<i>50 g/l avec Pac-L</i>	13	2	1,20	9	-
	<i>100 g/l avec Pac-L</i>	30	25	1,20	9	5
	<i>50 g/l avec Barazan</i>	11	0	1,20	9	-
	<i>100 g/l avec Barazan</i>	11	20	1,20	9	<i>incontrôlable >50 ml</i>

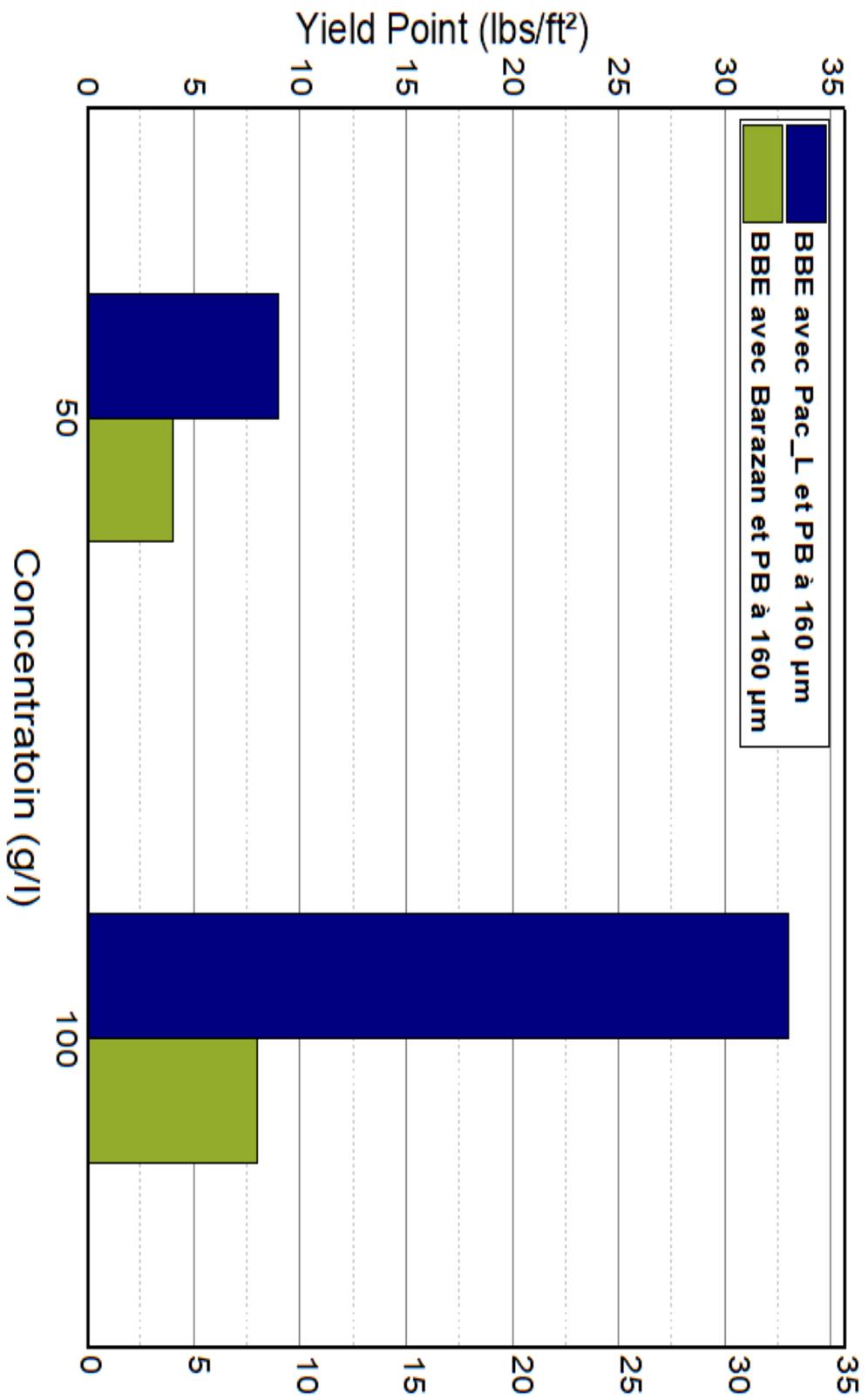


Figure -39 : Variation du yield point en fonction de la concentration de poudre de bois ajoutée à 160 µm en substituant du Pac-L et Barazan avant le Hot Rolling

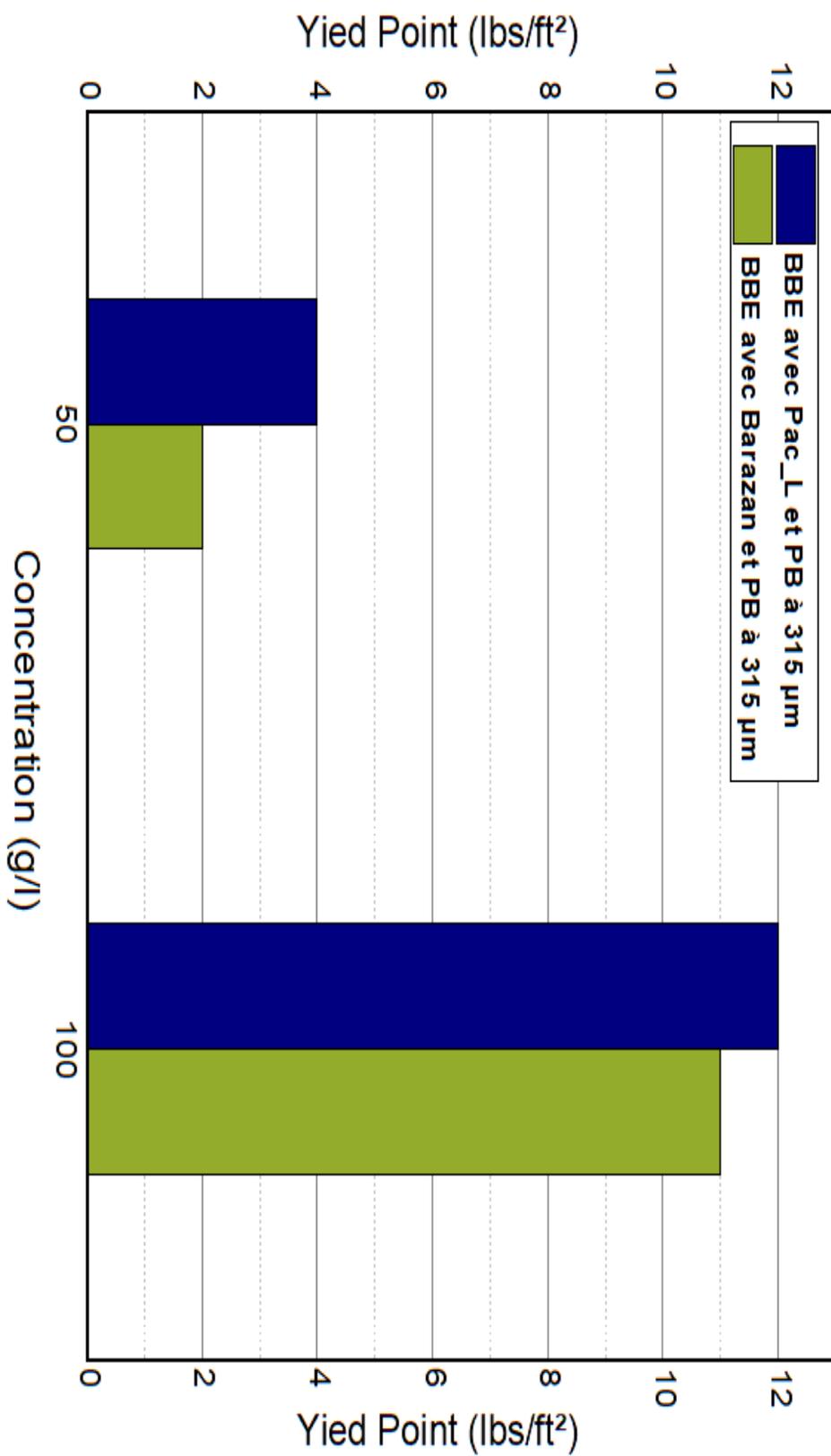


Figure -40- : Variation du yield point en fonction de la concentration de poudre de boisajoutée à 315 µm en substituant du Pac-L et Barazan avant le Hot Rolling

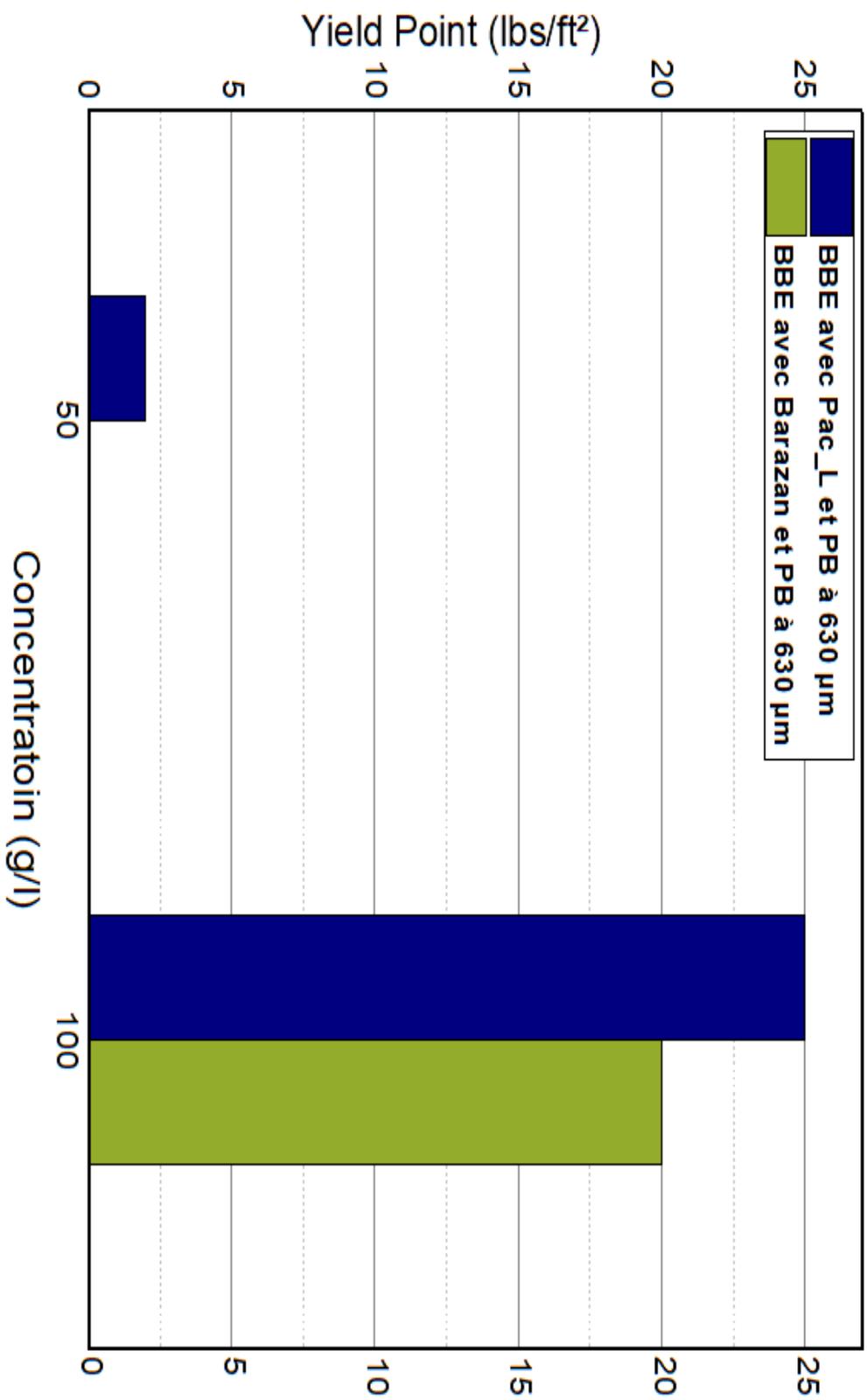


Figure -41 : Variation du yield point en fonction de la concentration de poudre de bois ajoutée à 630 µm en substituant du Pac-L et Barazan avant le Hot Rolling

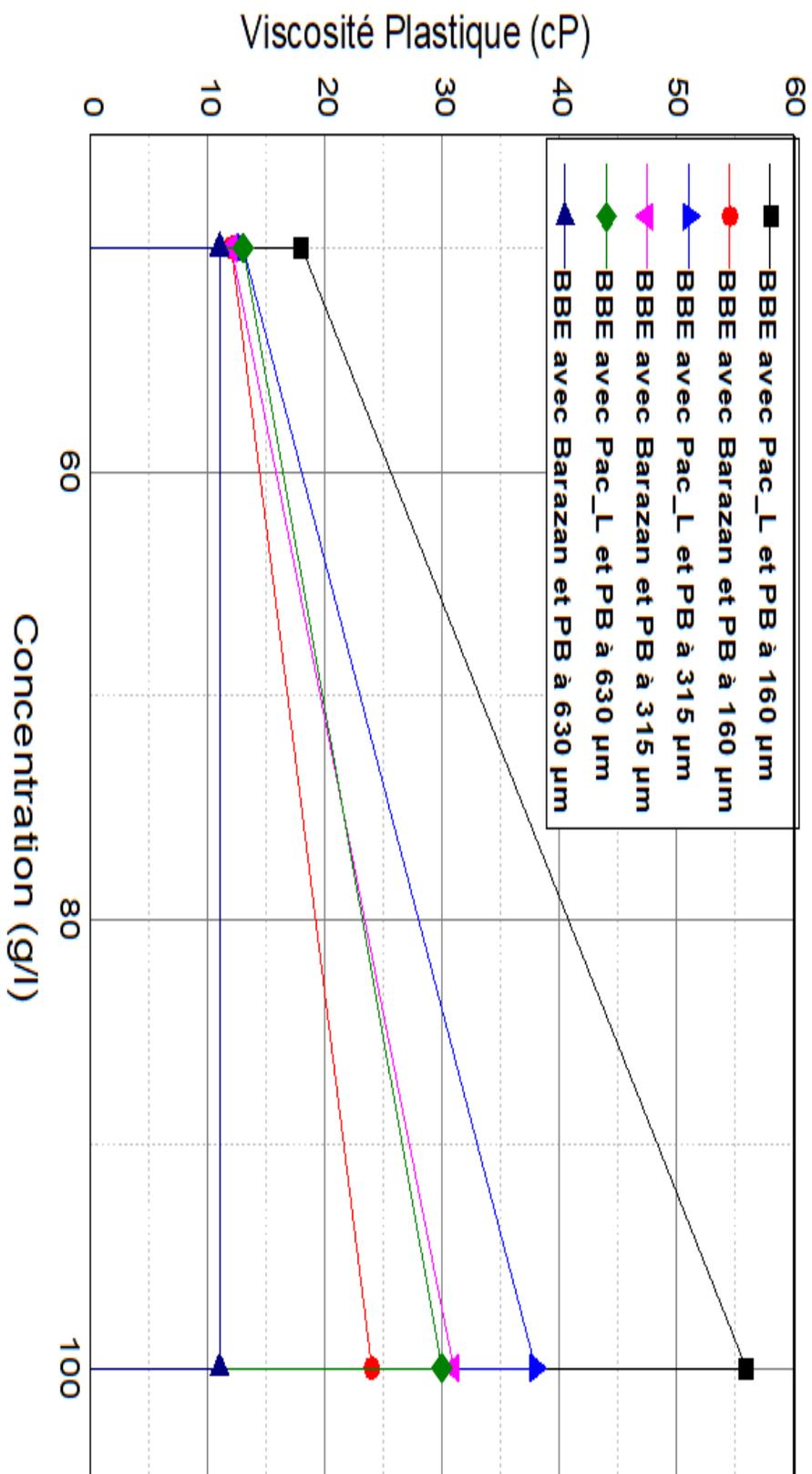


Figure 42 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la concentration de poudre de bois ajoutée à différentes dimensions en substituant du Pac-L et Barazan avant le Hot Rolling



Figure -43- : Filtrat API acceptable



Figure -44- : Filtrat API incontrôlable

D'après les résultats obtenus on remarque que le Yield point pour les échantillons augmente avec l'augmentation de la concentration de la poudre de bois pour les différentes tailles de la poudre de bois et cela pour les échantillons ou Pac-L et le Barazan ont été substitué par la poudre de bois. On peut dire d'après les résultats obtenus que le plus grand nombre des yeild point acceptables ont été obtenu pour les échantillons des boues ou on a substitué le Pac-L et le Barazan par la poudre de bois à 160 μm , les valeurs obtenues montrent que trois échantillons de boues parmi quatre ont des yeild point acceptables de 8 à 33 (lbs/ft²).

On peut également constater que le meilleur yeild point obtenu est celui de l'échantillon ou on a substitué le Barazan et le Pac-L par la poudre de bois de dimension de 630 μm à une concentration de 100 g/l il est de 25 et 20 (lbs/ft²).

Pour la viscosité plastique on constate que, elle augmente avec l'augmentation de la concentration de la poudre de bois et cela pour les différentes dimensions des particules de la poudre de bois pour les deux substitutions du Pac-L et du Barazan. Concernant le Ph on remarque qu'il est un peu basique, il est autour du 9.

Pour le filtrat API on constate qu'il y a trois échantillons ou on a obtenu des filtrats acceptables entre 5 et 7 ml.

6-2- Après Hot Rolling

Afin d'étudier le comportement de la boue de forage formulée, en remplaçant les polymères synthétiques par la poudre de bois en différentes concentrations et différentes tailles, aux varies conditions du puits en qualité de température et de pression on a fait passer les échantillons qui ont donné des bons Yeild Point par le test de Hot Rolling pendant 24 heures les résultats obtenus sont illustrées dans le tableau 11



Figure -45- : Appareillage du test Hot Rolling

Tableau -15-

<i>Taille de particules</i>	<i>Concentration</i>	<i>PV (cP)</i>	<i>YP</i>	<i>Ph</i>	<i>Filtrat API (ml)</i>
160 μm	<i>50 g/l avec Pac-L</i>	<i>34</i>	<i>3</i>	<i>6</i>	<i>Incontrôlable > 50 ml</i>
	<i>100 g/l avec Pac-L</i>	<i>50</i>	<i>18</i>	<i>6</i>	<i>6</i>
	<i>100 g/l avec Barazan</i>	<i>29</i>	<i>1</i>	<i>6</i>	<i>Incontrôlable > 50 ml</i>
315 μm	<i>100 g/l avec Pac-L</i>	<i>41</i>	<i>12</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
	<i>100 g/l avec Barazan</i>	<i>38</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>Incontrôlable > 50 ml</i>
630 μm	<i>100 g/l avec Pac-L</i>	<i>67</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>6</i>
	<i>100 g/l avec Barazan</i>	<i>44</i>	<i>2</i>	<i>6</i>	<i>Incontrôlable > 50 ml</i>

D'après les résultats obtenus on remarque que seuls deux échantillons parmi sept ont résisté au test de Hot Rolling, et ont donné des bons résultats dans des conditions réelles de puits (après le test Hot Rolling, les deux échantillons contiennent le polymère Pac-L avec une concentration en poudre de bois de 100 g/l avec des particules de poudre de bois d'une taille de 160 et 315 μm .

7- Partie II : Utilisation de la poudre de bois en tant que viscosifiant et réducteur de filtrat par substitution totale des polymères synthétiques par la poudre de bois

7-1- Avant Hot Rolling

Tableau -16-

Taille de particules	Concentration	PV (cP)	YP	Ph	Filtrat API (ml)
160 μm	10 g/l	-	-	6	Incontrôlable > 50 ml
	20 g/l	70	0	6	Incontrôlable > 50 ml
	30 g/l	65	2	6	Incontrôlable > 50 ml
	40g/l	52	9	6	Incontrôlable > 50 ml
	50g/l	48	14	6	Incontrôlable > 50 ml
	100g/l	41	20	6	Incontrôlable > 50 ml
315 μm	10 g/l	-	-	6	Incontrôlable > 50 ml
	20 g/l	-	-	6	Incontrôlable > 50 ml
	30 g/l	-	-	6	Incontrôlable > 50 ml
	40g/l	40	2	6	Incontrôlable > 50 ml
	50g/l	37	8	6	Incontrôlable > 50 ml
	100g/l	22	15	6	Incontrôlable > 50 ml
630 μm	10 g/l	-	-	6	Incontrôlable > 50 ml
	20 g/l	-	-	6	Incontrôlable > 50 ml
	30 g/l	-	-	6	Incontrôlable > 50 ml
	40g/l	34	0	6	Incontrôlable > 50 ml
	50g/l	24	3	6	Incontrôlable > 50 ml
	100g/l	19	14	6	incontrôlable>50 ml

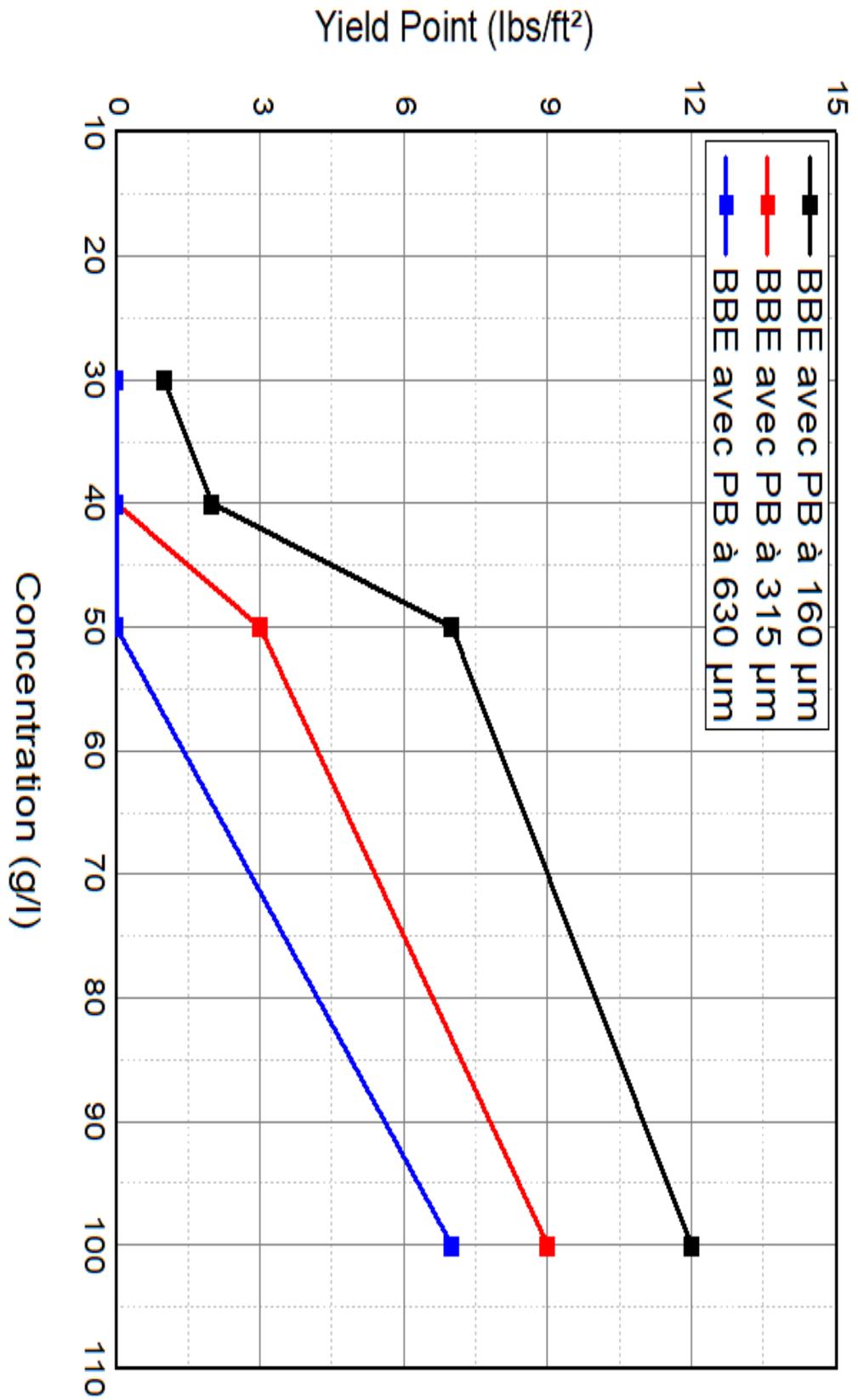


Figure -46- : Variation du Yield point en fonction de la concentration de la poudre de bois avant le Hot Rolling

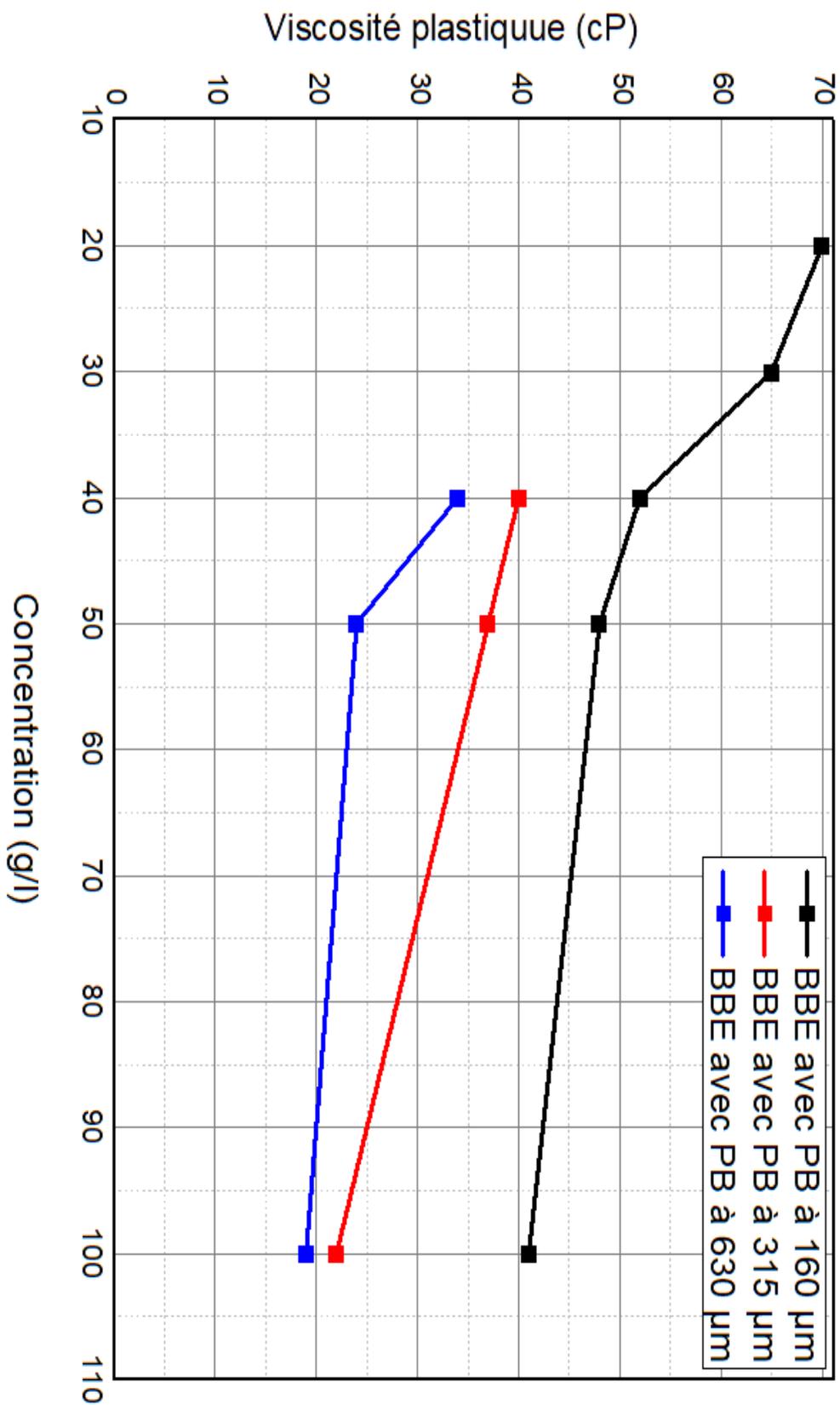


Figure -47- : Variation de la viscosité plastique en fonction de la concentration de la poudre de bois avant le Hot Rolling

Par la substitution totale des polymères (Pac_L et Barazan) par la poudre de bois on a obtenu des résultats qui sont satisfaisants et qui montrent que six boues ont présenté des bonnes propriétés physiques et rhéologiques en précisant le yield point, ces boues sont celles avec 40, 50 et 100 g/l, et avec des tailles de particules de 160 μm ; celles avec 50 et 100 g/l, avec des dimensions de particules de 315 μm ; et la boue avec 100 g/l et des de taille de 610 μm .

Il est à noter aussi que la viscosité plastique elle diminue avec l'augmentation de la concentration de la poudre de bois et cela pour les différentes dimensions des particules de bois mais reste toujours acceptable. Concernant le Ph on constate qu'il est un peu acide, il est autour du 6

Pour le filtrat API on remarque qu'il y incôntrolablale pour tous les échantillons.

7-1- Après le Hot Rolling

Les échantillons des boues qui ont donné un yield point acceptable ont été soumis au test de Hot Rolling pour étudier leur comportement dans les conditions réelles de température de pression du puits, les résultats sont mentionnés sur le tableau suivant :

Tableau -17-

Taille de particules	concentration	PV (cP)	YP	densité	Ph	filtrat API (ml)
160 µm	30 g/l	-	1	1,21	6	incontrôlable >50 ml
	40g/l	31	2	1,20	6	incontrôlable >50 ml
	50g/l	26	7	1,21	6	incontrôlable >50 ml
	100g/l	20	12	1,21	6	20
315 µm	30 g/l	-	-	-	6	-
	40g/l	37	0	1,19	6	incontrôlable >50 ml
	50g/l	33	3	1,19	6	incontrôlable >50 ml
	100g/l	23	9	1,19	6	incontrôlable >50 ml
630 µm	30 g/l	-	-	-	6	-
	40g/l	-	-	-	6	-
	50g/l	48	0	-	6	-
	100g/l	28	7	1,14	6	incotrolable >50 ml

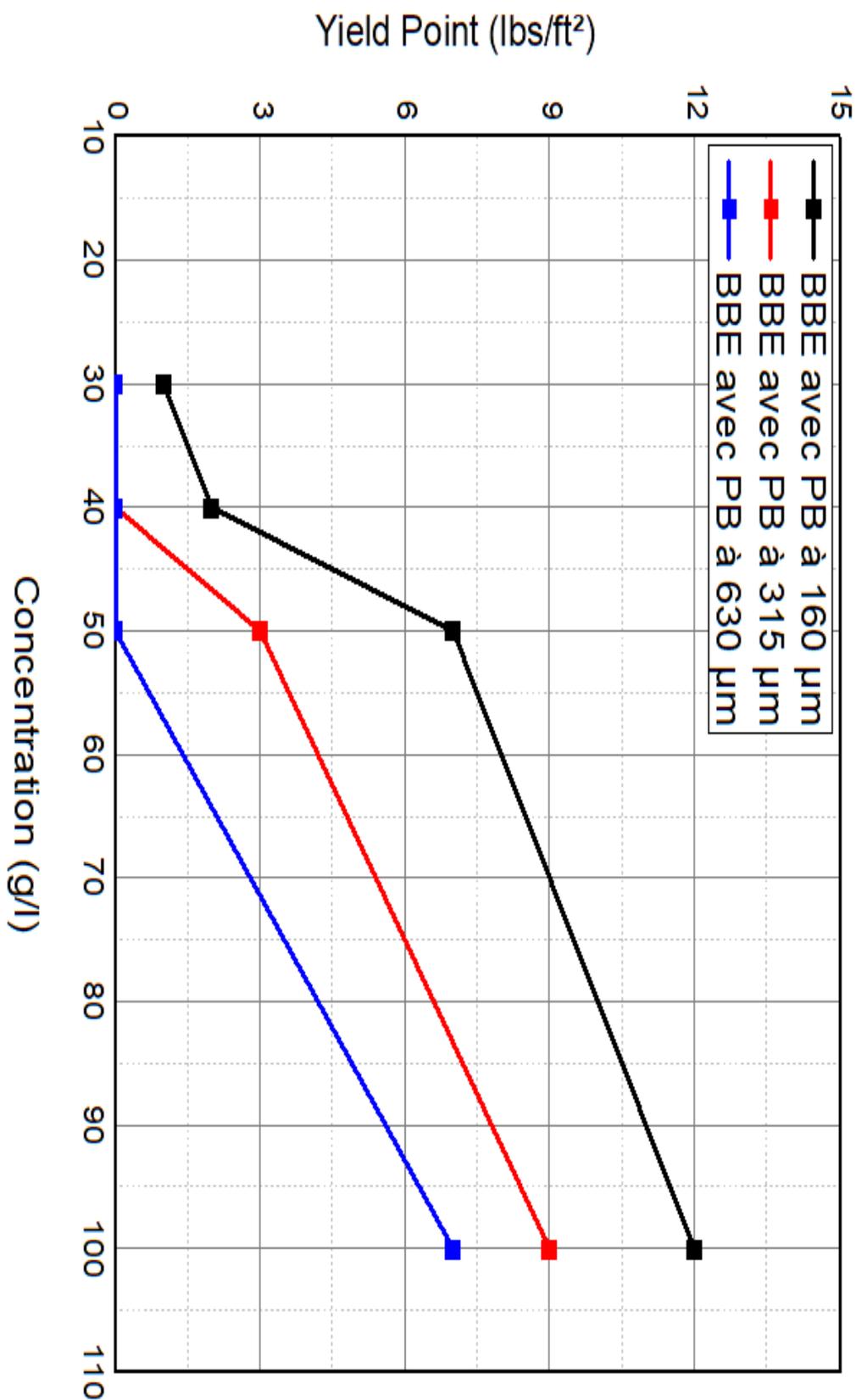


Figure -48- : Variation du Yield point en fonction de la concentration de la poudre de bois après le Hot Rolling

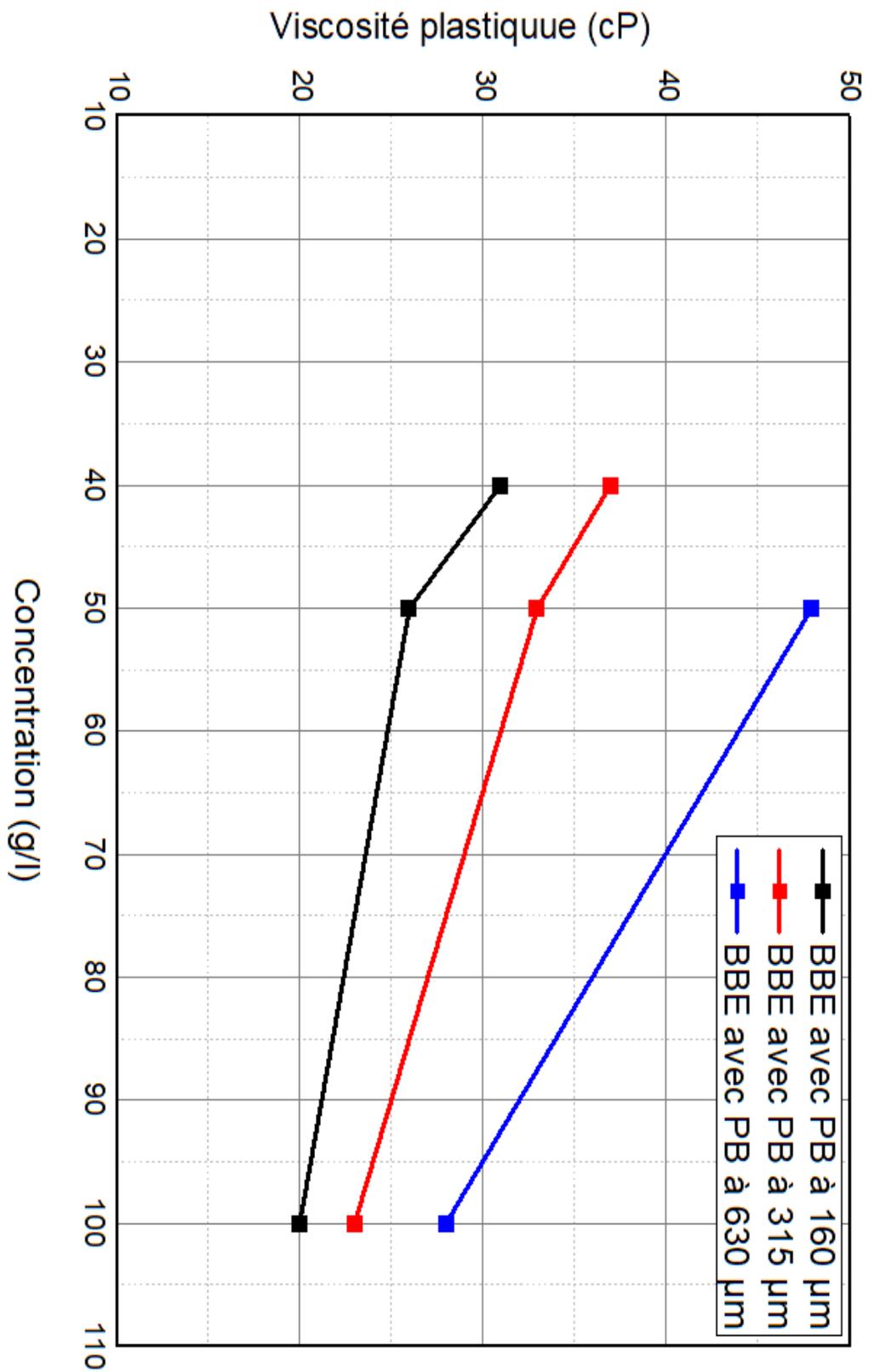


Figure -49- : Variation de la viscosité plastique en fonction de la concentration de la poudre de bois après le Hot Rolling

On remarque d'après les résultats obtenus après le test de Hot Rolling que les yield point est directement lié à l'augmentation de la concentration de la poudre de bois dans la poudre de bois, et cela pour les différentes dimensions des particules de la poudre de bois, et parmi tous les échantillons on constate que seulement deux qui ont résisté aux conditions de test de Hot Rolling, les échantillons en question sont celui avec une concentration de 100 g/l de poudre de bois de taille de 160 μm , et celui avec une concentration de 100 g/l de poudre de bois de taille de 315 μm .

La variation de la viscosité plastique est inversement proportionnelle à la variation de la concentration en poudre de bois.

8- Comparaison économique :

En faisant une comparaison entre le prix de revient d'une boue à base d'eau actuellement utilisée dans le forage des puits de pétrole au sud algérien, et celle contenant de la poudre de bois (par substitution à 100% de tous les polymères utilisés), on remarque que les déchets de bois peuvent être utilisés pour remplacer les polymères synthétiques, au moins comme agent viscosifiant ou agent réducteur de filtrat pour la boue de forage sans perturber les propriétés rhéologiques, physiques et chimiques de la boue.

Tableau -18-

		<i>Caractéristiques Rhéologique</i>					<i>Prix/m³</i>
	<i>Produits</i>	<i>Concentration</i>	<i>Viscosité</i>	<i>Viscosité</i>	<i>Yv</i>	<i>API</i>	
			<i>apparente</i>	<i>plastique</i>	<i>(lbs/100ft²)</i>	<i>filtrate</i>	
			<i>(cP)</i>	<i>(cP)</i>		<i>(cc/30 mn)</i>	
<i>Boue à base d'eau avec poudre de bois</i>	<i>Soude caustique</i>	<i>1</i>	<i>10</i>	<i>35</i>	<i>30</i>	<i>8</i>	<i><10 \$</i>
	<i>Le Carbonate De Sodium</i>	<i>1</i>					
	<i>Bentonite</i>	<i>80</i>					
	<i>Poudre d Bois</i>	<i>850</i>					
<i>Boue à base d'eau</i>	<i>Soude caustique</i>	<i>1</i>	<i>16</i>	<i>27</i>	<i>22</i>	<i>6</i>	<i>>50 \$</i>
	<i>Le Carbonate De Sodium</i>	<i>0.7</i>					
	<i>Bentonite</i>	<i>20</i>					
	<i>PAC-ul</i>	<i>5.7</i>					
	<i>PAC-R</i>	<i>0</i>					
	<i>CMC LV</i>	<i>6</i>					
	<i>XCD</i>	<i>0</i>					
	<i>KCl</i>	<i>40</i>					
	<i>Anti-moussant</i>	<i>0.5</i>					

Conclusion Générale

Le présent travail, nous a permis dans la première partie d'étudier le comportement rhéologique et les propriétés physiques pour caractériser des boues de forage à base d'eau, ces boues de forage ont été formulées à base des déchets de bois de pin d'alpe pour substituer les polymères organiques qui sont très coûteux et font souvent élever le coût de l'opération de forage des puits pétroliers. Il peut être conclu d'après les résultats obtenus que les boues de forage formulées avec la poudre de bois ont présentées de meilleures propriétés rhéologiques et des pertes de charge acceptables pour le forage. On a constaté aussi que par une substitution totale des polymères par la poudre de bois peut être utilisé à (300 μm à 850 kg / mm^3) comme réducteur de réducteur de filtrat pour les boues parce que le filtrat API obtenu est plus au moins acceptable pour le forage.

En tant que viscosifiant par substitution du CMC : Les propriétés physicochimiques et rhéologiques (Y_p , V_p) des boues étudiées ont nettement améliorées en présence des déchets de bois avec un dosage 50 au 100 kg/m³ quel que soit les fractions utilisées. Cependant, au-delà 100 kg/m³ de bois les boues présentent des propriétés rhéologiques très élevées ayant une viscosité que peut freiner l'opération de la circulation du fluide dans le puits ;

Le comportement rhéologique des boues étudiées a un comportement non-Newtonien quel que soit la taille des grains ou le dosage du déchet de bois ;

Il est à noter que le filtrat API des boues étudiées était conforme à la norme en présence du déchet de bois pour les trois dosages et tailles utilisés. En effet, le filtrat des boues étudiées a augmenté mais toujours reste dans la gamme requise pour les boues de forage à base d'eau.

En tant que réducteur de filtrat : Par substitution du PAC : Lorsque le déchet de bois est utilisé en tant que réducteur de filtrat par substitution du PAC, le filtrat a nettement augmenté de 4 à 150 ml et cette valeur est totalement rejetée pour les boues à base d'eau car la valeur maximale du filtrat ne dépasse pas 10 ml.

Il faut signaler aussi que l'étude des boues à base de déchet de bois ayant des tailles de particules de 610, 315 et celle de 160 μm à des concentrations moins de 50 g/l, ont données les mêmes valeurs du filtrat dépassant les 10 ml. Ce constat nous a permis de conclure que le déchet de ce type de bois ne peut être utilisé comme réducteur de filtrat quel que soit le dosage et la taille des grains.

Compte-nous avons utilisé un mélange de déchets de bois d'une boiserie sans faire la sélection, les résultats obtenus montrent que le plus grand nombre des yield point acceptables ont été obtenus pour les échantillons avec substitution des polymères par la poudre de bois à 160 μm (8 à 33 (lbs/ft²)). Après le test Hot Rolling, deux échantillons avec une concentration de 100 g/l et d'une taille de 160 et 315 μm ont résisté aux conditions réelles du puits.

Par la substitution totale des polymères par la poudre de bois, six boues ont donné des bonnes propriétés rhéologiques, parmi lesquelles deux ont résisté au test de Hot Rolling

(100 g/l et de taille de 315 et 610 μm) ; tandis que le filtrat API était incontrôlable donc soit on utilise les déchets de bois en association avec un additif réducteur de charge et régulateur de pH

Il faut signaler aussi que l'étude des boues à base de déchet de bois ayant des tailles de 610 μm , 315 μm et celle de 160 μm à une concentration moins de 50 g/l, ont données les mêmes valeurs du filtrat dépassant les 10 ml, c'est la raison pour laquelle nous n'avons présentés les résultats de ces boues. Ce constat nous a permis de conclure que le déchet de ce type de bois ne peut être utilisé comme réducteur de filtrat quel que soit le dosage et la taille des grains.

Selon la comparaison du prix de revient d'une boue à base d'eau contenant de la poudre de bois (par substitution à 100% de tous les polymères utilisés) et celle actuellement utilisée pour le forage des puits de pétrole en Algérie, il est remarquable que les déchets de bois peuvent être utilisés au moins comme agent viscosifiant ou agent réducteur de filtrat pour la boue de forage sans perturber les propriétés rhéologiques de la boue.

Perspectives :

Bien que ce travail ait permis de répondre à de nombreuses questions sur le recyclage et la valorisation des déchets du bois dans la formulation boues de forage à base, et ce pour substituer les polymères actuellement utilisés en tant que viscosifiant ou réducteur de filtrat de boue, des travaux qui constituent une continuation de cette investigation doivent être lancés, afin que cet axe puisse être approfondi et enrichi en abordant les thèmes suivants :

- Investigation sur d'autres types d'essences (bois) ;
- Etude rhéologique à l'état dynamique (en oscillation) de l'ensemble des formulations de boues étudiées dans ce travail ;
- Effet de l'effet combiné de la poudre de bois et d'autres types de polymères sur les caractéristiques rhéologiques et physico-chimiques des boues à base d'eau.

Références

- [1]: IFPEN - IFP School - Studio Humphrey, (Octobre 2014): Qu'est-ce qu'un fluide de forage?,
© CREAV Communication
- [2] : M.DADDOU ; Les caractéristiques physiques de la boue de forage ; SONATRACH Algérie;
2009 ;
- [3]: Garcia, C. et Parisot, P. (1981) Boues de forage, Technip, Paris.
- [4]: A.SLIMANI. Septembre (2003), Forage pour les non foreurs, Division forage, Département
formation, SONATRACH
- [5]: ENSPM (Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs). (1994), Initiation au forage
pétrolier, Formation Industrie, Gisement forage.
- [6]: Caenn, R. and Chilligar, G.V. (1996) Drilling fluids: State of the art, J. of Petroleum Sci. and
Eng.
- [7]: Coussot, P., Bertrand, F. and Herzhaft, B. (2004) Rheological behavior of drilling
muds, characterization using MRI visualization, Oil & Gas Science and Technology – Rev.
IFP, Vol.59, No. 1
- [8]: Hemphill, T., (2002) Low shear rate rheology : clarifying muddied waters AADE-02-DFWM-
HO-14, AADE Technical Conference.
- [9]: Kelessidis, V.C., Maglione, R., Tsamantaki, C. and Aspirtakis, Y., (2006)
Optimal determination of rheological parameters for Herschel–Bulkley drilling fluids and
impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling, J. of
Petroleum Sci. and Eng.
- [10]: Herzhaft, B., Rousseau, L., Néau, L., Moan, M., Bossard, F., (2002) Influence of temperature
and clays/emulsion microstructure on oil-based mud low shear rate rheology, SPE 77818.
- [11]: Jarny, S., (2004) Thixotropie des pâtes cimentaires. Thèse de doctorat du Laboratoire central
des ponts et chaussées.
- [12]: Coussot, P., (2005) Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials, Wiley, New
York.

- [13]: Baudez, J.C., Rodts, S., Chateau, X., and Coussot, P., (2004) A new technique for reconstructing instantaneous velocity profiles from viscometric tests : Application to pasty materials, *J. Rheol.*
- [14]: Ryaen, C., G. et Chillingar, V. (1996) Drilling fluids : state of the art, *Journal of petroleum science and engineering.*
- [15]: Economides, M. J. et al. (1988) *Petroleum well construction*, édition John Wiley and sons.
- [16]: Herzhaft, B. (2001) Les fluides de forage : un exemple de fluides complexes industriels, 36ème colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie (GFR 2001), Marne-la-Vallée France.
- [17]: Lummus, J. L. et Azar, J.J. (1986) *Drilling fluids optimization, a practical field approach*, 5, Penn Well Books, Tulsa, Oklahoma
- [18]: IDF (1988) *Product data manual*
- [19]: Abid, D. (1995) Synthèse sur les fluides de forage, rapport 419/94. Sonatrach/CRDBoumerdès, Algérie
- [20]: Hannachi, M. (1972) *Air Drilling. Eight Arab Petroleum Congress.* Alger
- [21]: S.N.Repal (1961) *Le forage à l'air. Compte rendu sur le forage à l'air à Djebel Onk (Algérie)*
- [23]: R. Keller. (1994) *La Constitution du Bois. Le Bois Matériau d'Ingénierie.* ARBOLOR, Nancy
- [24]: G. Nepveu. *Variabilité* (1994). *Le Bois Matériau d'Ingénierie.* ARBOLOR, Nancy
- [25]: A. Roesyadi (1987), *Valorisation de la sciure de bois de peuplier par autohydrolyse, hydrolyse acide, et hydrogenolyse sur des catalyseurs à base de ruthenium imprégné sur du charbon actif. Etude d'un réacteur triphasé d'hydrogenolyse de type verlimob à base d'une venturi à émulsion. Application du réacteur à l'hydrogenolyse des solutions aqueuses de glucose. Thèse de Doctorat présentée à l'Université Technologique de Compiègne ;*
- [26]: R. Alén, P. Oesch, E. Kuoppala (1995). *Py-GC/AED studies on the thermochemical behavior of softwood. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*
- [27]: K. Freudenberg, A.C. Neish (1968). *Constitution and Biosynthesis of Lignin.* SPRINGER, Berlin, Heidelberg, New York.
- [28]: E. Adler (1977). *Lignin chemistry—past, present and future.* Wood Science and Technology.
- [29]: D. Fengel et G. Wegener (1984), *Wood chemistry, ultrastructure, reactions*, Walter de Gruyter edition, New York.

- [30]: J.P. Haluk (1994). Composition chimique du Bois. Le Bois Matériau d'Ingénierie. ARBOLOR, Nancy
- [31]: R.H. Marchessault (1962), Application of infra-red spectroscopy to cellulose and wood polysaccharides. Pure Appl Chem.
- [32]: M. Marx-Figini. In RM Brown, ed (1982), Cellulose and Other Natural Polymer Systems: Biogenesis, Structure, and Degradation. Plenum Press, New York.
- [33]: Guedira (1988). Pyrolyse lente de la biomasse : comportement comparé des tourteaux d'olives, de la bagasse de cannes à sucre et de la sciure de bois. Thèse de Doctorat présentée à l'Université Mohammed V- Faculté des sciences de Rabat.
- [34]: ROSNAH M.S., « Production of carboxymethylcellulose (CMC) from oil palm empty bunch (EFB) », MPOB information series, ISSN 1511-7871, June 2004 13
- [35]: M.A BOUAZIZ, « introduction aux polymères hydrosolubles » IAP, Mai.2001. 16
- [36]: FRASER LJ: "New Method Accurately Analyzes PHPA's in Muds," Oil & Gas Journal 85, no. 27, 39-42 (July 6, 1987). 18
- [37]: ILLER, R.K. "The Chemistry of Silica". New York. John Wiley and Sons. 1979. 21
- [38]: Alderman NJ, Babu DR, Hughes TL, Maitland GC. Rheological Properties of water-based drilling muds, in 4th international Congress on Rheological, Sydney, I: p. I. (1988): [22].
- [39]: Amanullah MD, Long Y. Superior corn-based starches for oil field application, in New Director for a Diverse Planet: Proceedings for the 4th International Conference on Corns. Brisbane, Australia, (2004) 23
- [40]: Lenz RW, Biodegradable polymers, in Biopolymers Springer, Heidelberg. I: 1-40. (1993) [25].
- [41]: American Petroleum Institute. Principles of Drilling Fluid Control, 12th ed., I, University of Texas, Continuing Education Petroleum Extension service, Austin. (1969) [26].
- [42]: Sorbie KS. Polymer-Improved Oil Recovery, 7, Blackie, Glasgow. (1994) [28].
- [43] R.B. Bird, R.C. Armstrong, and O. Hassager, "Dynamics of Polymeric Liquids. Vol. 1: Fluid Dynamics", Wiley, New York, 2nd edition (1987)
- [44] P. Coussot, J.L. Grossiord, eds (2001), "Comprendre la rhéologie", EDP Sciences
- [45]: G. Couarraze, J.L. Grossiord (2000), "Initiation à la rhéologie", Technique et documentation, Lavoisier, 3^{ème} édition

- [46] A. Abdoulaye BA, Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier, thèse de doctorat Paris Tech, 2010.
- [47] R.B. Bird, R.C. Armstrong, and O. Hassager, "Dynamics of Polymeric Liquids. Vol. 1: Fluid Dynamics", Wiley, New York, 2nd 'edition (1987)
- [48] R.B. Bird, C.F. Curtiss, R.C. Armstrong, and O. Hassager, "Dynamics of Polymeric Liquids. Vol. 2: Kinetic Theory", Wiley, New York, 2`eme 'edition (1987)
- [49] R.G. Larson, "The structure and rheology of complex fluids", Oxford University Press, New-York (1999)
- [50] Stevanovic T., Perrin D. (2009). Chimie du bois, Ed. Lausanne.
- [51] Dulbeco P., Luro D. (1998). L'essentiel sur le bois, Ed. Paris CTBA.
- [52] Hazar C., Barette J.-P., Mayer J. (1996). Mémotech Bois et Matériaux Associés. Paris.
- [53] Sjöström E. (1993). Wood chemistry: Fundamentals and Applications. Academic Press, Inc.
- [54] Valette P., De Choudens C. (1992). Le bois, la pâte, le papier. 3ème edn. Centre Technique du Papier, Grenoble, France.
- [55] Briane, D., Doat, J., Guide Technique de la Carbonisation. EDISUD, 1985.
- [56] Valette, P., De Choudens, C., Le bois, la pâte, le papier. Ed. CTP Grenoble.
- [57] Saka, S., Chemical composition and distribution. Wood and Cellulosic Chemistry, Shiraishi N., Hon D.N.-S., Ed. M. Dekker, 1991.
- [58] Cloutier 11 A. Gandini, and M.N. Belgacem, La chimie des substances renouvelables, l'Actualité Chimique, 6-14 (2002)
- [59] Stevanovic T., Garneau F.X., Jean F.I., Gagnon H., Vilotic D., Petrovic S., Ruzic N., Pichette A. (2005). The essential oil composition of Pinus mugo Turra from Serbia. Flavour and Fragrance Journal, 20 (1).
- [60] Lenger, A.B., Pierson, J., Poncelet J. (1999). Transformation, utilisation et industries du bois en Europe, Allier-Liège. Editions du Perron.
- [61] Safi B., Zarouri S., Chabane-Chaouache R., Saidi M. and Benmounah A., Physico-chemical and rheological characterization of water-based mud in the presence of polymers, J Petrol Explor Prod Technol, 2016, 6(2):185–190

- [62] Bentrion A., Fourar K., Benmounah A. and Safi B.; (2014) Comparative Study of Biopolymers Action on Physico-Chemical and Rheological Properties of Water-Based Drilling Muds, Asian Journal of Chemistry; Vol. 26 (14): 4386-4390
- [63] Kayacier A, Dogan M (2006) Rheological properties of some gums sale mixed solutions. J Food Eng 72:261–265
- [64] Daoui A., Safi B., Rezak M., Zerizer A.,(2015) Use of wood waste (Aleppo pine) as a superplasticiser in self-compacting mortars, Journal Advances in Cement Research, Thomas Telford Ltd, 27(8): 457-463

Annexes

Baroid Fluid Services

BARAZAN® D

Viscosifier/Suspension Agent

Product Data Sheet

Product Description

BARAZAN D dispersion-enhanced xanthan biopolymer helps provide viscosity and suspension in fresh water, sea water, sodium bromide, potassium bromide, potassium chloride, and sodium chloride-based fluids.

Applications / Functions

- Viscosify fresh water and brine-based fluids used for drilling, milling, underreaming, and gravel packing operations
- Suspend bridging agents and weighting materials in fresh water and brine systems

Advantages

- Helps disperse easily in fresh water muds, and brines
- Helps provide thixotropic properties and non-Newtonian flow characteristics over a wide salinity range at low concentrations
- Helps provide excellent suspension without the need for clays
- Stable to 250°F (121°C)
- Helps minimize the potential for formation damage

Typical Properties

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| • Appearance | Yellow to white powder |
| • pH, (1% aqueous solution) | 6.3 |
| • Specific gravity | 1.6 |

Recommended Treatment

Mix 0.1-2 lb/bbl of BARAZAN D agent (0.3-5.7 kg/m³), as needed to obtain the desired viscosity and suspension characteristics.

Packaging

BARAZAN D agent is packaged in 25-lb (11.3-kg), 50-lb (22.7-kg), and 25-kg sacks.

HALLIBURTON | Fluid Systems

Baroid Fluid Services • P.O. Box 1675 • Houston TX 77251 • 281-871-5516

Because the conditions of use of this product are beyond the seller's control, the product is sold without warranty either express or implied and upon condition that purchaser make its own test to determine the suitability for purchaser's application. Purchaser assumes all risk of use and handling of this product. This product will be replaced if defective in manufacture or packaging or if damaged. Except for such replacement, seller is not liable for any damages caused by this product or its use. The statements and recommendations made herein are believed to be accurate. No guarantee of their accuracy is made, however.

BARAZAN is a registered trademark of Halliburton © 2005 Halliburton All Rights Reserved



Carbonate de Sodium Anhydre

Produit Chimique Spécialisé

Description	Le Carbonate de Sodium Anhydre est une poudre granulaire blanche utilisée principalement pour conditionner et adoucir l'eau d'appoint et pour augmenter le pH.
Applications/Fonctions	<ul style="list-style-type: none">• Traiter la dureté due au calcium dans l'eau d'appoint• Augmenter le pH
Avantages	<ul style="list-style-type: none">• Éliminer les ions calcium en les retirant sous la forme de carbonate de calcium non soluble• Maximiser le rendement de la bentonite et du produit polymère
Propriétés Typiques	<ul style="list-style-type: none">• Aspect Poudre de couleur variable (grise à brune)• pH de la solution 5% 11,5• Densité apparente, lb/ft³ 57-65
Traitement Recommandé	<ul style="list-style-type: none">• La dureté et les niveaux de pH de l'eau d'appoint devraient être vérifiés avant d'ajouter le Carbonate de Sodium Anhydre.• Le Carbonate de Sodium Anhydre devrait toujours être ajouté avant d'ajouter la bentonite ou le polymère au système de fluide.• Le Carbonate de Sodium Anhydre ne devrait pas être ajouté en même temps que les autres composants du fluide de forage.• Lors du traitement de l'eau d'appoint, les gammes de pH devraient être maintenues entre 8,5 et 9,5. <p>Traitement Général:</p> <ul style="list-style-type: none">• 1-2 livres par 100 gallons d'eau d'appoint ou 1,2-2,4 kilogrammes par mètre cube d'eau d'appoint.• Utiliser le produit de la façon requise pour éliminer les ions calcium, mais ne pas ajouter une quantité excessive car l'excès de traitement peut causer des effets préjudiciables et réduire le rendement des composants et/ou du système de fluide de forage.• Mélanger lentement avec un mélangeur à jet ou ajouter lentement dans le tourbillon d'un agitateur à grande vitesse.

Conditionnement Le Carbonate de Sodium Anhydre est conditionné en sacs multiplis en papier de 50-lb (22,7 kg) ou 100-lb (45,4 kg).

Disponibilité Le Carbonate de Sodium Anhydre peut être acheté auprès de tout Distributeur de Baroid Industrial Drilling Products. Pour trouver le distributeur de Baroid IDP le plus proche, contactez le Département de Service à la Clientèle à Houston ou le Représentant de Ventes IDP de votre région.

Baroid Industrial Drilling Products

Product Service Line, Halliburton

3000 N. Sam Houston Pkwy. E.

Houston, TX 77032

Service à la Clientèle Numéro Vert: (800) 735-6075 (281) 871-4612

Service Technique Numéro Vert: (877) 379-7412 (281) 871-4613
