REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES**

**Faculté des hydrocarbures et de la chimie**

Département : Gisements miniers et pétroliers

Filière : Hydrocarbures

Option : Forage des puits des hydrocarbures

## Mémoire de Fin d'Etudes

## En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

*Thème*

# *Effet de la température sur les propriétés rhéologiques et les paramètres d'écoulement des mélanges «Bentonite-PEO»*

**Présenté par :**

Zerdoudi Abderraouf

Merimeche Choayb

**Avis favorable de l'encadreur :**

M$^{me}$. Azril, N. Signature

**Avis favorable du Président du jury**

Nom Prénom Signature

**Cachet et signature**

# *Sommaire*

**Introduction générale** ……... 01

**Chapitre I : Notions sur les fluides de forage**

I.1. Principales fonctions des fluides de forage …… …… …… …… ……..... 02
I.2. Circulation du fluide de forage …… …… …… ….... 03
I.3. Classification des fluides de forage …… …… …… ……..... 04
I.3.1 Les fluides de forage à base d'huile ……..… …… …… ….....… 04
I.3.1.1. Les boues à l'huile …….. …… …… ……...… 04
I.3.1.2. Les boues inverses …… …… …… ……..…… 05
I.3.2. les fluides de forage à base d'eau ……. …… …… …… 05
I.3.2.1. les boues douces …… …… … ……..…… ……..…… 05
I.3.2.2. Les boues salées……... …… …… …… 05
I.3.2.3. Les boues à l'eau émulsionnée …… ……..……..…… 06
I.3.3. Les fluides de forage gazeux …… …… …… ……...……. 06
I.4. Contrôle des propriétés physiques et chimiques des boues ...…… …… ……..… .... 06
I.4.1. La densité …… …… ……..… … …… ……..…… …..…. 06
I.4.2. La filtration…… ……. …… … …… …… …..… 07
I.4.2.1. La filtration statique …… ……..…… …… … ……..…… 07
I.4.2.2. La filtration dynamique …… …… …… … …… ……...….. 08
I.4.3. Le pH…… …… ……..… …… … …… …… …… ….…… .. 08
I.4.4. Paramètres rhéologique …… ……... …… … …… …..…… 08
I.4.4.1. Viscosité plastique VP …… ……..…… …… … .. …… 08
I.4.4.2. La contrainte seuil «Yield Point Yp»…… …… ..… 08
I.4.4.3. Gels …… …… …… … …… …… …..……... 09

**Chapitre II : La rhéologie**

Préambule…….. 10
II.1. Les notions fondamentales de la rhéologie …… …… …… … ……... … .. 10
II.1.1. Contrainte de cisaillement …… …… …… … …… ……..…….. 10
II.1.2. Déformation et vitesse de cisaillement …… …… …… …..……...……... 10
II.1.3. La viscosité…… …… …… … …… …… ……...…… 11
II.1.3.1. La viscosité dynamique ou apparente $\mu_a$ …… ……..… ……... … . 11
II.1.3.2. La viscosité cinématique ν …… …… …… … ……..….... 11
II.2. les régimes d'écoulements …… …… …… … …… …… …..…… 12
II.2.1. Le régime laminaire …… …… …… … …… …… ……..….... 12
II.2.2. Le régime turbulent …… …… …… … …… …… ..…… 12
II.2.3. L'écoulement en bouchon …… …… …… … …… ……... .. 12
II.2.4. Le régime transitoire …… …… …… … …… …… …..….. 12
II.3. Types de fluides …… …… …… … …… …… …… ….…. 13
II.3.1. Les fluides rhéofluidifiants …… …… …… … ……..……...… 13
II.3.2. Les fluides rhéoépaississants …… …… …… … …… …… 13
II.3.3. Les fluides plastiques …… …… …… … …… ……..... 14
II.3.4. Les fluides thixotropes …… …….. …… … ……...… … 14
II.3.5. Les fluides antithixoropes …… …… …… … …… ……...…. 14
II.4. Les modèles de comportement d'écoulement …… …… …… ...… …….. 15
II.5. La viscoélasticité ……..……... 15
II.5.1. Cisaillement oscillatoire …….. ……. …….…… .. 16

**Chapitre III : Caractéristiques physico-chimiques des suspensions**


III.1.Les argiles ……. …….. …… .... …..…… 17
III.1.1. Classification des argiles …….. ……..…. ….. 17
III.1.1.1. Couche octaédrique ……. …… …..…….…. 17
III.1.1.2. Couche tétraédrique …….……. ……. …….…… 17
III.1.2. Propriétés des argiles ……..……..…… 19
III.1.2.1. Forme et surface spécifique ……. …… ……..….. 19
III.1.2.2. Capacité d'adsorption et de gonflement ……. ……..…... 20
III.1.2.2.1. Degré d'hydratation …… ……. ……. ……..… 20
III.1.2.2.2. Surfaces argileuses ……. …….. ……..... 21
III.1.2.3. L'échange cationique …… ……..……..….. 21
III.1.3. La bentonite ……..... 22
III.1.3.1. Microstructures de la bentonite ……. 22
III.1.3.1.1. Le feuillet ……..…..... 22
III.1.3.1.2. La particule primaire……...……..…... 22
III.1.3.1.3. L'agrégat ……..…… 23
III.2. Les polymères ……. ……. …… ……. …….. ….. 23
III.2.1. Structure fondamental des polymères ……...…... …… ….... 24
III.2.2. L'effet de la température sur la rhéologie du polymère ….….. ……...…. 25
III.2.3. Les fonctions et les caractéristiques principales des polymères dans les fluides de forage …….. …….. ……. ……..... 25
III.2.3.1. Les viscosifiants …… …… 26
III.2.3.2. Les Défloculants ……. …… ..……..... 26
III.2.3.3. Les Floculants ……. ……. …… ……. 26
III.2.3.4. Les Surfactants ……. ……. ……..…... 26
III.3. Interactions particulières ……. 27
III.3.1. Mécanisme de floculation …….. 27
III.3.2. Mécanisme de défloculation ……. 27
III.3.3 .Interactions argile- polymère-eau ……..….. 27
III.3.3.1. Interactions argile-eau ……..…… . 27
III.3.3.2. Interactions polymère-eau ……..……..… 27
III.3.3.3. Interactions argile-argile …….…… 27
III.3.3.4. Interactions polymère-argile ……...…… 27
III.3.3.5. Interactions polymère-polymère ……..……..…. 28
III.4. Rappel sur les colloïdes ……. …….. ……..... 28


## Chapitre IV : Méthodes et mesures expérimentales


IV.1.Méthodes de mesure et matériaux ……. ……...…... 29
IV.1.1. Méthodes de mesures ……. ……..... 29
IV.1.1.1.Mesures de poids des suspensions ……. …… 29
IV.1.1.2. Mesures de pH des suspensions ……..……. …….. 29
IV.1.1.3. Agitation ……. ……..... 29
IV.1.1.4.Mesures rhéologiques des suspensions ……...……. ……...….... 29
IV.1.2.Matériaux ……. ……..….. 31
IV.1.2.1.Le solvant «l'eau» ……. ……. 31
IV.1.2.2. La bentonite ……. ……..... 32
IV.1.2.3.Polyéthylène oxyde «PEO» ……. …… 32
IV.1.3. Le protocole de travaille ……. ……..... 32

IV.1.3.1. Préparation des échantillons ……. …… 32
IV.1.3.1.1. Préparation des suspensions de bentonite……. …… 32
IV.1.3.1.2. Préparation des solutions aqueuses de PEO ……. …….. 32
IV.1.3.1.3. Préparation du mélange bentonite-PEO ……... 32
IV.1.3.2.Les mesures expérimentales……. ……... 33
IV.1.3.2.1.Le régime stationnaire……. ……... 33
IV.1.3.2.2.Le régime dynamique……. ……... 33
IV.2.Résultats et discussion ……. ……..... 34
IV.2.1. Régime stationnaire ……. ……..... 34
IV.2.1.1.La modélisation ……. ……..... 37
IV.2.2. Régime dynamique ……. ……..... 40
IV.2.2.1.Le balayage par contrainte ……. ……... 40
IV.2.2.2.Le balayage par fréquence ……. …… 41
IV.2.2.3.Le balayage en temps ……. ……..... 42
IV.2.3.Variation de pH de suspensions ……. ……. 44
IV.2.3.1.Variation de pH de suspension de bentonite ……. ……. 44
IV.2.3.2.Variation de pH de suspension de bentonite+PEO ……. ……... 44

## Chapitre V : Simulation d'écoulement d'un fluide de Carreau

V.1.Les équations d'écoulement ……. ……..……..... 46
V.1.1.L'équation de conservation de masse ……. ……..... 46
V.1.2.L'équation de conservation de la quantité de mouvement ……...…..... 46
V.2.La géométrie……. ……..……..... 47
V.3.Test de maillage ……. ……..……... ….. 48
V.4.les résultats ……. ……..……..……..... 49
V.4.1.Profil de vitesse axiale ……..……..……. ……. 49
V.4.2.La pression ……. ……..……..... 50
V.4.3.La contrainte à la paroi ……. ……...….. ….. 51
V.4.4.La vitesse moyenne ……. ……...……..... 52
V.4.5.Perte de charge ……. ……...…….. 53

**Conclusion générale**…… …… 54

# *Liste des figures*

## Chapitre I

Figure I.1. Circuit de la boue de forage.

## Chapitre II

Figure II.1. Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.
Figure II.2. Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.
Figure II.3. Rhéogramme pour un fluide : a) non newtonien b) newtonien.
Figure II.4. Les lignes de vitesse dans un écoulement laminaire.
Figure II.5. Les lignes de vitesse dans un écoulement turbulent.
Figure II.6. Courbe d'écoulement pour les différents types du fluide.
Figure II.7. Courbe de la viscosité η en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$.
Figure II.8. Courbe d'écoulement pour un fluide thixotropique et antithixotropique.

## Chapitre III

Figure III.1. Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1 [Luckham et Rossi (1999)].
Figure III.2. Structure laminaire des unités octaédriques (Eslinger et Peaver 1988).
Figure III.3. Structure tétraédrique (Eslinger et Peaver 1988).
Figure III.4. Représentation de la Kaolinite 1:1.
Figure III.5. Représentation de la smectite (White 1999 )1 :1.
Figure III.6. Forme des particules argileuses (Velde, 1995).
Figure III.7. Surface des particules argileuse.
Figure III.8. Localisation de l'eau dans les particules argileuses (Velde, 1995).
Figure III.9. Adsorption à l'équilibre (Schroeder, 2002).
Figure III.10. Rôle de pH sur l'adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002).
Figure III.11. Structure multi-échelle de la montmorillonite [Le Pluart *et al.* (2004)].
Figure III.12. Les différents types d'espaces poreux [Touret *et al.* (1990)].
Figure III.13. Schéma représentant les mécanismes d'adsorption des polymères sur les argiles.

## Chapitre IV

Figure IV.1 : Géométrie de Couette cylindrique.
Figure IV.2 : Le rhéomètre «Anton Paar MCR 301».
Figure IV.3 : Les courbes d'écoulement de la contrainte de cisaillement(A), la viscosité (B) en fonction du taux de cisaillement et la contrainte seuil (C) en fonction de la température pour la suspension de bentonite seule.
Figure IV.4 : Les courbes d'écoulement de la contrainte de cisaillement(A), la viscosité (B) en fonction du taux de cisaillement et la contrainte seuil (C) en fonction de la température pour la solution aqueuse de PEO.
Figure IV.5 : Les courbes d'écoulement de la contrainte de cisaillement(A), la viscosité (B) en fonction du taux de cisaillement et la contrainte seuil (C) en fonction de la température pour le mélange «PEO+bentonite».
Figure IV.6 : Les courbes d'écoulement modélisées de la suspension de bentonite.
Figure IV.7 : Les courbes d'écoulement modélisées de solution aqueuse de PEO.

Figure IV.8 : Les courbes d'écoulement modélisées du mélange «PEO+bentonite».
Figure IV.9 : La comparaison entre les courbes d'écoulement de la bentonite et la bentonite+PEO.
Figure IV.10 : La variation de paramètres de Carreau pour la suspension de la bentonite.
Figure IV.11 : La variation de paramètres de Carreau pour le mélange «la bentonite+PEO».
Figure IV.12 : Evaluation des modules G' et G'' en fonction de la contrainte de cisaillement «$\omega = 10\ rad/s$» pour le système «la bentonite seule».
Figure IV.13 : Evaluation des modules G' et G'' en fonction de la contrainte de cisaillement «$\omega = 10\ rad/s$» pour le système «la bentonite+PEO».
Figure IV.14 : Evaluation des modules G' et G'' en fonction de la fréquence angulaire «$\tau = 0.1\ Pa$» pour le système «la bentonite seule».
Figure IV.15 : Evaluation des modules G' et G''en fonction de la fréquence angulaire «$\tau = 0.1\ Pa$» pour le système «la bentonite+PEO».
Figure IV.16 : Evaluation des modules G' et G'' en fonction du temps «$\tau = 0.09\ Pa$ ; $\omega = 10\ rad/s$» pour le système «la bentonite seule».
Figure IV.17 : Evaluation des modules G' et G'' en fonction du temps «$\tau = 0.09\ Pa$ ; $\omega = 10\ rad/s$» pour le système «la bentonite+PEO».
Figure IV.18 : La variation de temps de gélification en fonction de la température.
Figure IV.19 : La variation de pH de suspension de la bentonite seule en fonction de la température.
Figure IV.20 : La variation de pH du mélange «la bentonite+PEO » en fonction de la température.
Figure IV.21 : La comparaison entre la variation de pH du mélange «la bentonite+PEO» et la suspension de bentonite en fonction de la température.

## Chapitre V

Figure V.1 : La géométrie de la conduite de simulation.
Figure V.2 : la conduite de simulation maillée.
Figure V.3 : Le profil de vitesse axiale en fonction du Reynolds à température 25°C.
Figure V.4 : Les courbes de pression en fonction du Reynolds à température 25°C.
Figure V.5 : Courbe de la contrainte à la paroi en fonction du Reynolds à température 25°C.
Figure V.6 : La variation de la vitesse moyenne en fonction du Reynolds à température 25 °C.
Figure V.7 : La variation de λ en fonction du Reynolds à température 25 °C.

# *Liste des tables*

## Chapitre II

Tableau II.1 : Les différentes équations rhéologiques.

## Chapitre III

Tableau III.1 : Surface spécifique des particules argileuses (Eslinger et Peaver 1988).
Tableau III.2 : Surface spécifique et CEC de quelques minéraux argileux.
Tableau III.3 : Groupes polaires.
Tableau III.4 : Température de transition pour les différents polymères.
Tableau III.5 : les relations entre les fonctions d'un polymère dans un fluide de forage et ses structures générales.

## Chapitre IV

Tableau IV.1 : Caractéristiques de rhéomètre utilisé dans ce mémoire.
Tableau IV.2 : Composition chimique de la bentonite (285234-500G).
Tableau IV.3 : La varaition du pH de la bentonite en fonction de la température.
Tableau IV.4 : La varaition du pH de la bentonite+PEO en fonction de la température.

# Introduction générale

La boue de forage a une importance capitale dans un chantier de forage pétrolier grâce à ses rôles primordiaux, comme elle est la première barrière de sécurité contre les venues de fait de sa pression hydrostatique exercée sur les parois du puits, donc sa densité doit être assez élevée pour empêcher la pénétration des fluides de formation et elle ne doit pas être très grande, afin d'éviter la fracturation des roches. Grâce à la filtration de sa partie liquide, un film argileux sera formé sur les parois par conséquent il va les maintenir stables. Ainsi la boue doit avoir une viscosité bien déterminée pour assurer le nettoyage du puits et une bonne évacuation des déblais. Alors, ces paramètres et d'autres doivent être toujours contrôlés et ajustés pour minimiser les coûts et les problèmes de forage.

Le gradient géothermique tend à augmenter au fur à mesure que le forage devient profond tout dépend de la zone forée «le cas général est 3 degrés Celsius chaque 100 mètres » à cause de l'augmentation de la température, un problème de floculation peut être rencontré dans le cas des boues bentonitiques (WBM), donc maintenir les caractéristiques rhéologiques et de dispersion à haute température est un paramètre très important pour la réussite de l'opération du forage et ceci représente l'intérêt pratique de notre travail.
L'originalité de ce travail consiste à la formulation et la caractérisation rhéologique d'une suspension de bentonite de base à laquelle on ajoute 0.5% du Polyéthylène Oxyde, produit utilisé dans l'industrie comme fluidifiant et ceci pour des températures variables allons jusqu'à 65C°.

Notre travail est divisé en deux volets, le premier est consacré à une revue bibliographique traitant les fluides de forage dans le premier chapitre, notion de rhéologie dans le deuxième et le troisième traite les caractéristiques physico-chimiques des suspensions à base de bentonite.
Le deuxième volet est consacré à une étude expérimentale de nos suspensions de bentonite commençant par une caractérisation rhéologique des suspensions bentonite-PEO en fonction de la température en régime stationnaire (courbe d'écoulement) et dynamique (suivi cinématique) ceci a été l'objet du quatrième chapitre pour passer ensuite à une simulation de l'écoulement d'un fluide non newtonien à travers une conduite cylindrique dans le dernier chapitre.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Depuis le siècle dernier, le développement des exploitations pétrolières s'avère d'une grande importance alors que l'exploitation d'un gisement pétrolier nécessite plusieurs opérations :

- Localisation de la roche réservoir et confirmation de la présence des hydrocarbures.
- Evaluation de la viabilité économique du développement.
- Le forage et la mise en production des puits de pétrole et de gaz.

Par ailleurs, le succès d'une opération de forage est assuré en grande partie par le bon choix du fluide de forage.

L'historique de la boue de forage se divise en 4 périodes :

- Avant 1901 : période artisanale.
- 1901 à 1928 : période empirique.
- 1928 à 1955 : période expérimentale.
- A partir 1995 : période technique.

En 1929 on a commencé à employer les bentonites pour augmenter la viscosité et les phosphates pour la diminuer. En 1935 la 1ère boue à huile est utilisée pour forer une zone productrice.

Un fluide de forage est un système composé de différentes combinaisons liquides (eau, huile), et gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension une phase solide (argile, déblais). C'est un fluide complexe non newtonien visqueux ou viscoélastique.

## I.1.Principales fonctions des fluides de forage

Les fluides de forage sont toujours appelés boue, mais les ingénieurs n'ont plus recours à l'eau et l'argile. A présent, ils préparent des composés et des mélanges satisfaisant aux besoins spécifiques des différentes conditions de forage. Les fluides de forage modernes constituent réellement l'élément vital du puits, sans ces fluides les puits profonds actuels n'existeraient pas.

Comme les puits sont de plus en plus profonds, les fluides de forage ont pris de l'importance, en répondant à un grand nombre de besoins et en résolvant de problèmes très différents d'un endroit à un autre. Parmi les rôles d'un fluide de forage, on peut citer :

- **Nettoyage du puits**

La boue doit débarrasser le puits des particules de formation forées qui se présentent sous forme de débris de roche appelés « cuttings » ou « déblais ».

- **Maintien des déblais en suspension**

Le fluide de forage doit non seulement débarrasser le puits des déblais de forage durant les périodes de circulation, mais il doit également les maintenir en suspension pendant les arrêts de circulation.

- **Sédimentation des déblais fins en surface**

Alors que la boue doit permettre le maintien en suspension des déblais dans le puits durant les arrêts de circulation, ce même fluide doit laisser sédimenter les déblais fins en surface, afin de les éliminer. Bien qu'apparemment ces deux aptitudes semblent contradictoires, elles ne sont pas incompatibles.

- **Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde**

Du fait de son passage en surface, la boue en circulation se trouve à une température inférieure à celle des formations ce qui lui permet de réduire efficacement l'échauffement de la garniture de forage et de l'outil. Cet échauffement est dû à la transformation d'une partie de l'énergie mécanique en énergie calorifique et le gradient géothermique.

- **Prévention du cavage et des resserrements des parois du puits**

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

- **Dépôt d'un cake imperméable**

La filtration dans les formations perméables d'une partie de la phase liquide de la boue crée un film sur les parois du sondage, ce film est appelé cake. Le dépôt du cake permet de consolider et de réduire la perméabilité des parois du puits.

- **Prévention des venues d'eau, de gaz ou d'huile**

Afin d'éviter le débit des fluides contenus dans les réservoirs rencontrés en cours de forage, la boue doit exercer une pression hydrostatique suffisante pour équilibrer les pressions de gisement. La pression hydrostatique souhaitée est maintenue en ajustant la densité entre des valeurs maximum et minimum.

- **Augmentation de la vitesse d'avancement**

Au même titre que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation et le débit du fluide, le choix du type et les caractéristiques de la boue conditionnent les vitesses d'avancement instantanées, la durée de vie des outils, le temps de manœuvre, en un mot, les performances du forage.

Un filtrat élevé augmente la vitesse d'avancement. Les très faibles viscosités sont aussi un facteur favorable à la pénétration des outils.

- **Entraînement d'outils (turbine, MWD, etc.)**

Dans le cas du turboforage la boue entraîne la turbine en rotation. Cette fonction, l'amenant à passer à travers une série d'évents et à mettre en mouvement des aubages, implique certaines caractéristiques et rend impossible ou très délicat l'utilisation de certains produits (colmatant).

- **Diminution du poids apparent du matériel de sondage**

Bien que ce soit beaucoup plus une conséquence qu'une fonction, la présence d'un fluide d'une certaine densité dans le puits permet de diminuer le poids apparent du matériel de sondage, garniture de forage et tubages, ceci permet de réduire la puissance exigée au levage.

- **Apport de renseignements sur le sondage**

La boue permet d'obtenir des renseignements permanents sur l'évolution des formations et fluides rencontrés. Ces renseignements sont obtenus :

- Par les déblais remontés avec la circulation du fluide,
- L'évolution des caractéristiques physiques et/ou chimiques de la boue,
- La détection de gaz ou autres fluides mélangés à la boue.

## I.2.Circulation du fluide de forage

La boue de forage est en circulation continue durant toute la durée du forage aussi bien dans le sondage qu'en surface. Le fluide est préparé dans les bacs à boues, il est injecte à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil, ensuite, il remonte par l'espace annulaire chargé de déblais formés au front de taille. À la sortie du puits, il subit divers traitement (tamisage, dilution, ajout de produit,…etc.) de telle façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques et rhéologiques par rapport aux valeurs importantes (avant injection).

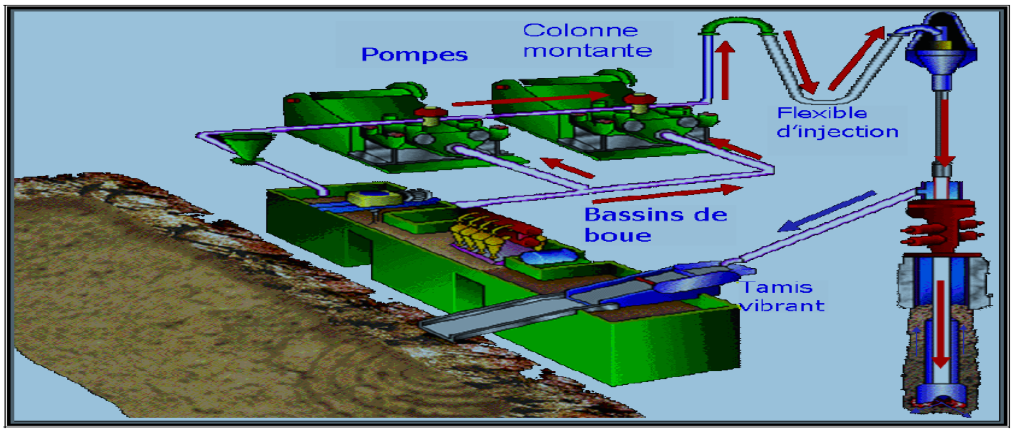


**Fig.I.1.** Circuit de la boue de forage.

## I.3.Classification des fluides de forage

Traditionnellement, les fluides de forage sont classés en trois catégories en accord avec le fluide de base utilisé dans leur préparation, c'est-à-dire la nature du fluide de base : l'air, l'eau et l'huile.

- Des boues à base d'eau.
- Des boues à base d'huile.
- Des boues à base d'air.

### I.3.1.Les fluides de forage à base d'huile

Les boues à l'huile sont choisies pour leur stabilité à des hautes températures, lubrification et attributs stabilisants le trou de puits, bien qu'elles aient des propriétés particulières, il est difficile de les assurer qu'avec des boues à l'eau, leur utilisation occasionnent quelques difficultés, tels que la manipulation spéciale et les problèmes environnementaux.

Les fluides de forage à base d'huile se devisent en 2 catégories :

- Boues à l'huile « boue directe »
- Boues inverses.

#### I.3.1.1.Les boues à l'huile

**Caractéristiques**

- La boue à l'huile cause le minimum de dommage aux formations productrices.
- Elle possède les caractéristiques nécessaires à de bonnes conditions de forage.
- Faible filtration d'huile.

**Domaine d'utilisation**

- Forage et carottage de réservoirs.
- Reprise et entretien de puits producteurs.
- Forage de zones difficiles en présence d'un fluide à base d'eau (argiles gonflantes, problème de coincement, etc..).

**Composition courante**

- Huile de base 95 % à 98 % du volume. On utilise de l'huile diesel à de l'huile brute très asphaltique dont les caractéristiques les plus importantes sont : densité, point éclair, indice d'acidité et point d'aniline.
- Eau : 2 à 5 %, pourcentage à contrôler, permet d'adapter les caractéristiques générales de la boue à l'huile, elle est émulsionnée
- Agents plastifiants : pour contrôler la filtration et la viscosité, on ajoute des produits tels que : « Asphalte soufflé, argile organophile, ….etc. »
- Agents émulsionnants et stabilisants.
- Agents fluidifiants.
- Alourdissant : « $CaCO_3$;$BaSO_4$ ; Galène ».
- Agent de neutralisation de l'eau.

**Avantages**

- Contrôle aisé des caractéristiques en l'absence de venues d'eau ou de brut.
- Insensibilité aux contaminants habituels des boues à base d'eau «NaCl, $CaSO_4$, ciment, argile »
- Réduction des frottements de la garniture sur les parois du puits d'où la diminution du couple de torsion et de l'usure de la garniture.
- Moindres dommages à la formation, etc.

**Inconvénients**

- Sensibilité à l'eau et à certains bruts.
- Manipulation salissante.

- Risque d'incendie.
- Difficultés pour déceler la présence d'huile dans les déblais.
- Prix de revient au $m^3$ plus élevé que les boues à l'eau, etc.

**I.3.1.2.Les boues inverses**

Elles sont des émulsions inverses dont la phase continue est une huile organique ou minérale et la phase dispersée est une solution aqueuse de 50% ou plus du volume au tout en gardant l'avantage d'une phase externe consistée par l'huile. Des agents viscosifiants, émulsifiants, fluidifiants et alourdissant sont alors additionnés.

**Caractéristiques**

Les mêmes que les boues à l'huile mais permet de pallier certains inconvénients de celles-ci.

**Domaine d'utilisation**

Le même que les boues à l'huile, mais en plus :

- Grandes épaisseurs de sels ou d'anhydrite.
- Problèmes de forage à haute température.
- Problèmes de déviation.
- Forage de faible température atmosphérique.

**Avantages**

Les mêmes que la boue à l'huile mais en plus :

- Risques d'incendies moindres.
- Prix du $m^3$ moins élevé.
- Traitement de surface plus facile.

**I.3.2.Les fluides de forage à base d'eau**

Ils sont généralement constitués par des suspensions d'argile (bentonite), des solides inertes (carbonates,..) dont les caractéristiques rhéologiques sont ajustées par l'addition de polymères viscosifiants (Xanthane,..). Des réducteurs de filtrat entrent également dans leur composition « Carboxy-Méthyl-Cellulose CMC, polymères synthétiques ». Ces fluides sont moins couteux et moins polluants, cependant la dégradation thermique des polymères utilisés dans ces formulations présente un inconvénient majeur pour le bon déroulement d'une opération de forage. Il est possible de classer ce type de fluides en trois catégories :

**I.3.2.1.Les boues douces**

Elles sont des boues à base d'eau douce, elles se devisent en 3 familles :

**La boue de forage naturelle** : « eau + argiles de formation »

C'est en général le fluide de début de sondage « Mud Spud ».

**La boue bentonitique**

- La boue bentonitique simple «sans amincissant ».
- La boue bentonitique avec amincissants minéraux.
- La boue bentonitique aux dérivés de la lignine et du lignite «La boue au FCL et LC».
- La boue bentonitique aux extraits tannants «parmi les tanins le plus utilisés est le Quebracho».

**La boue gypse**

Elle est sursaturée en sulfate de calcium « $Ca\ SO_4$ » 5 à 10 fois la saturation de la phase liquide de pH < 11.

**I.3.2.2.Les boues salées**

Elles sont des boues à base d'eau salée ou salée saturée :

- Boue à l'eau de mer.
- Boue salées saturées. « La phase continue est une saumure ».
- Boue salée saturée sans amincissant.

- Boue salée saturée avec amincissant minéraux.

La saturation est : 350 kg de Na Cl/1 $m^3$ d'eau à température ambiante.

L'amincissant employé est en général la chaux éteinte « $CaOH_2$ », quelque fois la soude caustique « NaOH ».

### I.3.2.3.Les boues à l'eau émulsionnée

La boue à l'eau émulsionnée est une boue à l'eau + 5 à 10 % d'huile.

Ces caractéristiques comme celles de la boue à l'eau, et en plus :

- Diminution du filtrat.
- Pouvoir lubrifiant.
- Diminution du frottement.

Son domaine d'utilisation est celui de la boue à l'eau, et en plus :

- Augmentation de la tenue des marnes.
- Diminution des risques de coincement.

### I.3.3.Les fluides de forage gazeux

Ils sont des fluides dont la phase continue est du gaz mélangé avec de l'eau en propositions variables prévenant de la formation traversée (inévitablement) ou ajoutée intentionnellement. Le gaz peut être de l'air, du gaz naturel ou de la mousse ou du brouillard.

## I.4.Contrôle des propriétés physiques et chimiques des boues

Tout comme la formulation des boues, le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisés selon des normes précises éditées par l'API. Là aussi, il faut employer un appareillage spécifique et des protocoles particuliers. Certaines mesures sont réalisées systématiquement sur tous les forages (viscosité, densité, filtration) et d'autre, selon le coût et les possibilités du forage (taux de gaz, alcalinité). Sur site, le boueux « Mud Engineer » est chargé du contrôle de la qualité de la boue. A partir des mesures réalisées et de ses connaissances, il corrige si nécessaire, la composition de la boue en ajoutant certains produits ou en reformulant la boue. Les outils disponibles pour contrôler sur site la rhéologie de la boue sont de deux types :

- Tout d'abord, un outil encore très largement utilisé est le viscosimètre Marsh ;
- Le deuxième type d'appareil utilisé sur chantier est un rhéomètre rotatif FANN 35.

À partir de ces mesures, les normes API imposent de calculer 3 paramètres correspondant à un modèle de Bingham : VP « viscosité plastique », YP « contraint seuil » et VA « viscosité apparente ». Deux autres mesures sont réalisées afin de caractériser la thixotropie de la boue :« Gel 0 » et « Gel 10 » qui sont des mesures de contraintes à très faible vitesse normalisée respectivement après 10 secondes et 10 minutes de repos. Ces mesures sont nécessaires et doivent être réalisées si on envisage une application au chantier pour une formulation de boue.

### I.4.1.La densité

C'est un paramètre important des boues de forage. Elle doit être suffisamment élevée pour contre balancer la pression exercée par les venues d'eau, d'huile et de gaz et par conséquent les éruptions. Il ne faut pas également qu'elle dépasse la limite de résistance des formations traversées pour ne pas les fracturer et pour ne pas avoir une perte de boue au cours de sa circulation. La pression exercée par la boue est donnée par l'expression suivante :

$$P = h*d/10 \qquad \textbf{(I.1)}$$

Où :

P : pression hydrostatique ; en Kgf/cm2.

h : profondeur de la couche traversée; en m.

d : densité de la boue.

### I.4.2.La filtration

Les fluides de forage sont des suspensions composées d'une phase liquide et des particules solides. La filtration se réfère à la phase liquide du fluide de forage forcé à traverser la formation perméable causé par la différence de pression. Durant ce processus les particules solides sont retenues à la surface de la paroi, formant un cake de filtration.

Les systèmes de boue doivent être conçus pour s'écouler à travers une formation poreuse et sceller les zones perméables aussi vite que possible avec des cakes lisses et minces. Dans les formations de haute perméabilité avec de larges pores, toute la boue pourrait envahir la formation (selon la taille des particules solides de la boue). Dans de telles situations des agents de liaisons doivent être utilisés pour arrêter les pertes de boue, la taille des agents de liaisons doit être la moitié de la taille des pores de la formation, on peut citer dans cette gamme : les carbonates de calcium, les dérivées de la cellulose et une variété d'autres matériaux réducteurs de filtrat.

Le filtrat a une importance capitale dans le forage d'un puits, il doit être suffisamment élevée pour augmenter la vitesse d'avancement, suffisamment bas pour ne pas déliter ou faire gonfler les formations argileuses et marneuses et pour éviter les coulages du matériel tubulaire en face des zones perméable (calcaire, dolomie, grés, etc.). Il ne doit pas envahir les formations productives, car il peut occasionner des émulsions avec l'huile en place ou modifier la porosité et la perméabilité de ses formations.

Deux sortes de filtrations ont lieu pendant le forage : la filtration statique pendant arrêt de la circulation du fluide, et la filtration dynamique au cours de la circulation du fluide qui entraîne une érosion du cake formé. Le volume du filtrat est fonction :

- Du temps ;
- De la pression différentielle ;
- De la viscosité du fluide ;
- De la température ;
- De la distribution en taille des particules.

Les propriétés de filtration des fluides de forage sont évaluées et contrôlées par des tests API. Ce sont des tests en régime statique utilisant un filtre presse standardisé. Ces tests peuvent être réalisés à hautes pressions et hautes températures.

#### I.4.2.1.La filtration statique

Le processus de filtration statique des suspensions classiques des particules solides dans un liquide est d'une manière générale bien connu ; (Fergusson et Klotz, 1954), (Glen et Slussers, 1959) ont étudié plus particulièrement le cas des boues de forage. Fergusson et Klotz ont montré que la filtration de ces fluides ne suit qu'en partie la théorie classique résumée comme suit :

$$\boldsymbol{V = K.t^{1/2}} \qquad \textbf{(I.2)}$$

Avec :

V : volume filtré de liquide ($cm^3/s$).

K : perméabilité du cake (1 darcy= $1\mu m^2$).

t : temps mesuré du début de la filtration (s).

Lors de la filtration statique, le cake s'épaissit continuellement au cours du processus. D'après la loi de Darcy, la vitesse de filtration à travers un cake de porosité donnée par approximation est de la forme suivante :

$$\frac{\boldsymbol{dv}}{\boldsymbol{dt}} = \mathbf{k}.\frac{\boldsymbol{\Delta p}}{\boldsymbol{\mu.e.A}} \qquad \textbf{(I.3)}$$

Où :

$\Delta p$ : Pression ($Kgf/cm^2$) ; A : Surface ($cm^2$) ;

μ : viscosité (cP) ;
v : volume filtré pendant un temps ($cm^3/s$);
e : épaisseur du cake après un temps (cm).
t : temps(s);
k : perméabilité du cake,
(1 darcy= $1\mu m^2$);

**I.4.2.2.La filtration dynamique**

La filtration dynamique est nettement différente de la filtration statique, souvent avec des taux de filtration plus considérable. Il n'existe aucune corrélation directe entre les mesures de filtration statique API, HTHP « High Temperature High Pressure » et la filtration dynamique.

**I.4.3.Le pH**

Une solution aqueuse peut contenir divers ions, elle possède toujours une plus ou moins grande quantité d'ions $H^+$ et $OH^-$ dissociés. Pratiquement, le pH des boues de forage couramment utilisées varie entre 6 et 13.5. Les boues dont le pH est inférieur à 10.5 sont dites à bas pH, celles dont le pH est supérieur à 10.5 sont dites à pH élevé. Le pH est mesuré :

- Soit par une méthode colorimétrie (papier pH ou indicateurs colorés).
- Soit par une méthode électrométrique (pH-mètre), au moyen d'électrodes en verre.

La mesure du pH est insuffisante pour permettre un bon contrôle des propriétés de la boue de forage. Elle est d'ailleurs parfois difficilement à contrôler, surtout aux pH élevé, cas où elle manque de sensibilité.

Une mesure complémentaire s'avère nécessaire, c'est l'alcalinité. Lorsque le pH apporte la concentration en ions $H^+$ (ou $OH^-$) libres, la mesure des alcalinités donne les concentrations en bases solubles ou insolubles, dans les boues de forage, ces bases sont principalement des carbonates, bicarbonates et hydroxydes et à un degré moindre, les silicates, les phosphates, les aluminates et les bases organiques.

Trois alcalinités sont mesurées en pratique : pb, pf, Mf.

Où : b signifie boue, f filtrat, p phénolphtaléines, M méthylorange.

Le virage à la phénolphtaléine se produit à pH égale à 8.2 et celui du méthylorange est de 4.2.

**I.4.4.Paramètres rhéologiques**

La connaissance du comportement rhéologique des boues de forage est d'une importante capitale pour bien cerner tout son écoulement et pour savoir par quelle loi rhéologique cette boue est régie. La loi la plus simple du comportement est représentée par le modèle dit newtonien, tandis que les autres types de fluides sont qualifiés de non newtoniens. Les caractéristiques les plus recherchées par l'étude rhéologiques sont :

**I.4.4.1.Viscosité plastique VP**

Elle dépend avant tout de la teneur en solides contenus dans la boue, une augmentation de viscosité plastique en pourra être donc combattue que par l'élimination des solides. Par ailleurs, la viscosité plastique est également liée à la taille des particules, et à leur forme.

$$\mathbf{VA = L_{600}/2\ (cP)} \qquad \mathbf{(I.4)}$$

$$\mathbf{VP = L_{600} - L_{300}\ (cP).} \qquad \mathbf{(I.5)}$$

«$L_{300}$ et $L_{600}$ sont les lectures respectives à 600 rpm et 300 rpm sur le rhéomètre FANN 35».

**I.4.4.2.La contrainte seuil « Yield Point YP »**

Les solides présents dans la boue de forage influencent un autre paramètre autre que la viscosité plastique, c'est la contrainte seuil la plus connus sous le nom de Yield Value. La contrainte seuil est la mesure de résistance initiale à franchir pour que le fluide s'écoule. Cette résistance est due aux forces électrostatique attractives localisées sur ou près de la surface des particules, c'est une mesure dynamique.

La contrainte seuil dépend des types des solides présents, de leur charges de surface, respectives, de la concentration de ces solides, du type et la concentration des autres ions ou sels qui peuvent être présents.

$$YP=L_{300}-VP\ (lb/100ft^2) \quad (I.6)$$

**I.4.4.3.Gels**

Une boue de forage laissé au repos édifie progressivement une structure qui augmente sa rigidité et qui peut être réduite par agitation. On appelle thixotropie le fait que ce phénomène soit réversible et non instantané. Le caractère thixotropique d'une boue est évalué en mesurant d'une part le gel 0 et d'autre part le gel 10 après un repos de la boue de 10 min. Le gel 0 varie pratiquement comme la viscosité plastique et le gel 10 comme la contrainte seuil.

**I.4.4.3.A.Le gel 0**

Il représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue. Il est mesuré à l'aide du viscosimètre du type FANN35 à une vitesse de 3 tr/min. il est exprimé en $lb/100ft^2$

**I.4.4.3.B.Le gel 10**

Il représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 min, la mesure est faite de la même manière que pour le gel 0. Il exprimé en $lb/100ft^2$.

## Préambule

C'est un mot inventé par Bingham en 1929 à partir du verbe grec « Rhéo » qui veut dire s'écouler et « Logie » qui veut dire science. Alors, c'est une branche de la physique qui s'intéresse à la déformation et l'écoulement des matériaux sous des sollicitations mécaniques, thermiques ou physico-chimiques.

La rhéologie est une science qui n'a que 70 ans mais son histoire remonte très loin. Devant l'impuissance de la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides (théories élaborées au 19e siècle) à décrire et à expliquer les propriétés des matériaux aux comportements mal définis et intermédiaires entre celui du solide élastique parfait (où les contraintes sont proportionnelles aux déformations) et celui du fluide newtonien (où les contraintes sont proportionnelles aux vitesses de déformation), il est apparu nécessaire d'élaborer cette nouvelle discipline.

Les études expérimentales s'attachent à mesurer les propriétés de l'écoulement des matériaux tandis que les approches théoriques cherchent les équations constitutives reliant les contraintes et les déformations.

$$\gamma = f(\tau) \qquad \textbf{(II.1)}$$

**(II.1)** c'est l'équation rhéologique d'état de la substance.

L'équation rhéologique ne dépend pas seulement de la nature et des propriétés du matériau, elle dépend aussi de la température **T** et de la pression **P** extérieures. Il serait donc plus correct d'écrire :

$$\gamma = f(\tau, P, T) \qquad \textbf{(II.2)}$$

## II.1.Les notions fondamentales de la rhéologie

### II.1.1.Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement $\tau$ est une grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives en contact se déplacent relativement l'une par rapport l'autre. Il apparait 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 «**Fig.II.1**».

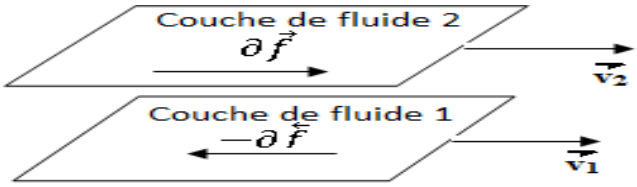


**Fig.II.1.** Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.

### II.1.2.Déformation et vitesse de cisaillement

Ces deux grandeurs constituent les grandeurs cinématiques fondamentales en rhéologie. Pour un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane, le matériau est cisaillé entre deux planes parallèles, l'un mobile, l'autre immobile «**Fig.II.2**».

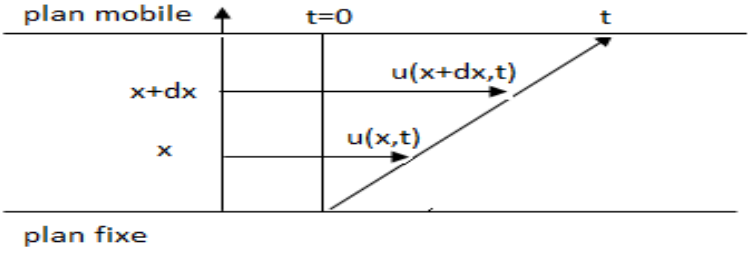


**Fig.II.2.** Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles

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 «**II.3**»: $\boldsymbol{\gamma = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}}$ **(II.3)**

Cette grandeur est sans dimension, elle ne dépend pas du déplacement **u(x, t)** lui-même mais de la variation de ce déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une couche infiniment proche. L'expression de la vitesse de cisaillement $(\dot{\gamma})$ est donnée par : $\boldsymbol{\dot{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial t}}$ **(II.4)**

Il s'agit de la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement.

$\dot{\gamma}$ a la dimension de l'inverse d'un temps et s'exprime en $\mathbf{s^{-1}}$.

### II.1.3.La viscosité

La notion de viscosité traduit une résistance à la déformation ou bien au glissement relatif des couches adjacentes du fluide les unes par rapport aux autres. C'est une grandeur physique essentielle en rhéologie, sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau étudié. La viscosité s'exprime en «**Pa.s**» ou «**Poise**» elle est notée **μ**. On définit différents coefficients de viscosité :

#### II.1.3.1.La viscosité dynamique ou apparente $\mu_a$

C'est le rapport de la contrainte par la vitesse de cisaillement correspondante.

$$\boldsymbol{\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} [N.s/m^2] ou [Pa.s]} \quad \textbf{(II.5)}$$

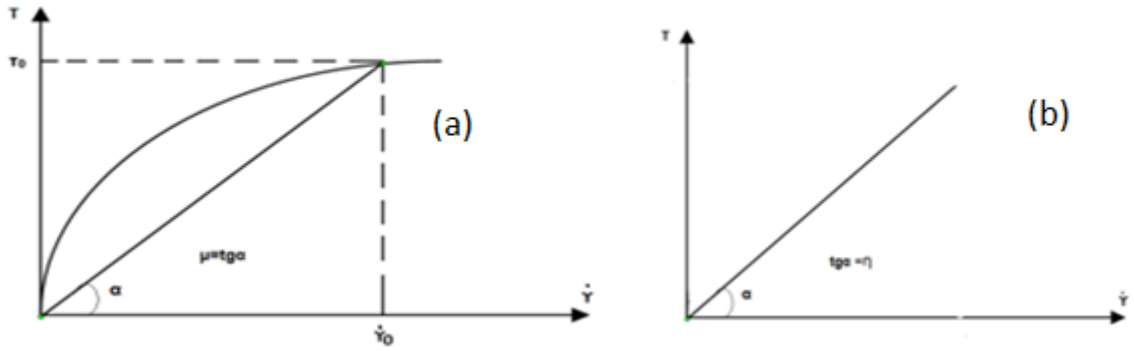


**Fig.II.3.** Rhéogramme pour un fluide a) non newtonien, b) newtonien

Si l'on se reporte au rhéogramme «$\boldsymbol{\tau = f(\dot{\gamma})}$», « **Fig.II.3**» on observe que pour une valeur de $\boldsymbol{\tau}$ donnée (où de $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ ), **μ** est égal à la pente de la droite joignant l'origine au point représentatif considéré. Il existe certaines substance (Newtoniens) **μ** ne dépend pas de la contrainte de cisaillement. Leur viscosité dynamique est alors appelé viscosité absolue et noté **η**. L'équation rhéologique d'un corps newtonien est : $\boldsymbol{\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta}}$ **(II.6)**

Où **η** n'est fonction que de la température et de la pression extérieures. Le rhéogramme représentatif de l'équation de Newton est une droite de pente **η** « **Fig.II.3**».

#### II.1.3.2.La viscosité cinématique ν

$$\boldsymbol{\nu = \frac{\mu_a}{\rho}\ [m^2/s]} \quad \textbf{(II.7)}$$

**ρ**: masse volumique du fluide $\boldsymbol{[Kg/m^3]}$.

## II.2.Les régimes d'écoulement

### II.2.1.Le régime laminaire « Laminar flow»

Dans lequel chaque lame de fluide se déplace l'une par rapport à l'autre parallèle à la direction de l'écoulement avec vitesse propre. Pour un écoulement dans un tube cylindrique, la vitesse est max le long de l'axe du tube, elle est nulle à la paroi.

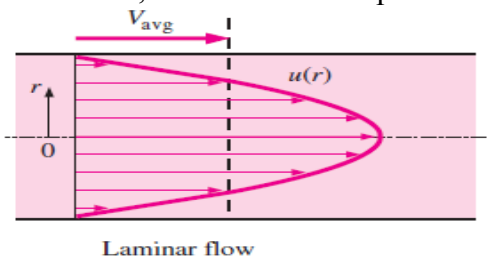


**Fig.II.4.** Les lignes de vitesse dans un écoulement laminaire

### II.2.2.Le régime turbulent « turbulent flow »

Il est caractérisé par la formation de petits tourbillons répartis dans toute la masse du liquide.

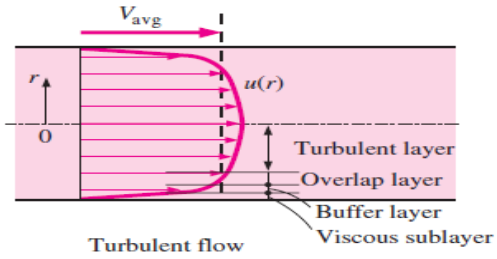


**Fig.II.5.** Les lignes de vitesse dans un écoulement turbulent

### II.2.3.L'écoulement en bouchon « plug flow »

Où le fluide se déplace le long du tube comme un bouchon sur un plan perpendiculaire à la direction de l'écoulement, la vitesse est constante. Cet écoulement n'existe que pour certaines catégories de fluides, une suspension de bentonite «fluide plastique» peut s'écouler en bouchon contrairement à l'eau, le gas-oil ou une solution de glycérine.

### II.2.4.Les régimes transitoires

Où les conditions d'écoulement viennent d'être modifiées et le régime définitif n'est pas encore établi. Le régime est transitoire, par exemple, pendant la mise en vitesse du fluide lors d'un changement de débit, lors d'un changement de section… etc. La limite entre régime laminaire et régime turbulent est caractérisée, dans chaque situation expérimentale particulière, par la valeur $\mathbf{R_0}$ que prend un nombre **R** appelé nombre de Reynolds, et défini de la façon suivante :

$$\boldsymbol{R = \frac{\bar{V}.l}{\nu}} \qquad \textbf{(II.8)}$$

Où :

- $\bar{V}$ est la vitesse moyenne d'écoulement.
- $l$ est une longueur caractéristique de rhéomètre (par exemple, dans le cas des rhéomètres de types Couette, $l$ représente la distance séparant les deux surfaces solides).
- $\nu$ est la viscosité cinématique du matériau.

Ce nombre de Reynold, présente la propriété d'être sans dimension. Dans chaque cas particulier rencontré, la limite entre régime turbulent et régime laminaire sera définie par une certaine valeur $\mathbf{R_0}$ telle que :

- Si $\mathbf{R} < \mathbf{R_0}$ régime laminaire.

- Si **R** > **R₀** régime turbulent.

Connaissant la valeur de **R₀**, il est facile de déterminer la vitesse moyenne d'écoulement limite **V_limite** afin de rester toujours en régime laminaire : $$V_{limite} = \frac{R_0 \nu}{l} \quad \textbf{(II.9)}$$

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

- Par leur comportement en régime transitoire, représenté par le temps de réponse aux modifications d'écoulement.
- Par leur comportement laminaire, caractérisé par la courbe d'écoulement expérimentale ou rhéogramme.
- Par leur comportement au repos, représenté par le développement d'un gel en fonction du temps s'ils sont thixotropes.

## II.3.Types de fluides

Il y a 4 grands types d'écoulement «**Fig.II.6.**».

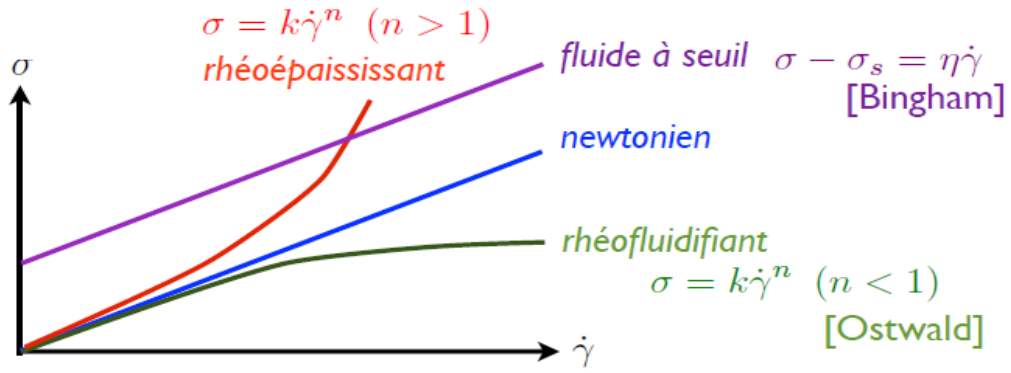


**Fig.II.6.** Courbe d'écoulement (la contrainte en fonction du taux de cisaillement) pour les différents types du fluide.

La famille des fluides non-newtoniens est la famille la plus vaste qui représente la majorité des fluides, elle s'est groupée en :

### II.3.1.Les fluides rhéofluidifiants

La viscosité d'un fluide rhéofluidifiant diminue lorsque le taux de cisaillement augmente. La dépendance de la viscosité au taux de cisaillement peut varier considérablement d'un produit à l'autre, mais également pour un même liquide, selon sa température et sa concentration. La cause de la rhéofluidification réside dans le fait qu'un taux plus élevé déforme et /ou réorganise les particules, ce qui réduit la résistance à l'écoulement et par conséquence la viscosité «**Fig.II.7**».

### II.3.2. Les fluides rhéoépaississants :

La viscosité d'un fluide rhéoépaississnt augmente en même temps que le taux de cisaillement. Ce type de comportement se rencontre généralement parmi les suspensions très concentrées. Un fluide rhéoépaississant manifeste un comportement dilatant, c'est-à-dire, le solvant agit comme lubrifiant entre les particules en suspension lorsque le taux de cisaillement est faible, mais le solvant est expulsé lorsque le taux de cisaillement est plus élevé, ce qui augmente la compacité des particules, par exemple le sable humide et les suspensions d'amidon concentrée «**Fig.II.7**».

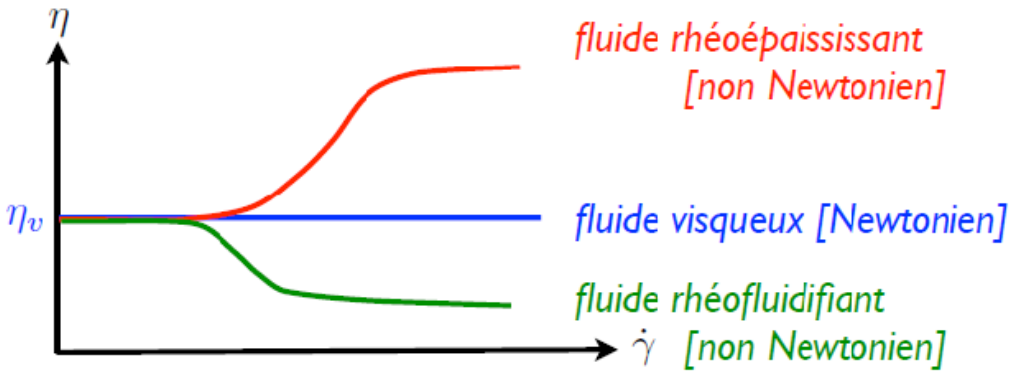


**Fig.II.7.** Courbe de la viscosité en fonction du taux de cisaillement.

### II.3.3. Les fluides plastiques

Les fluides plastiques sont des fluides présentant un seuil de plasticité. Dans la pratique, il faut appliquer une force importante avant que la matière ne commence à couler comme un liquide. Si la force appliquée est inférieure à la force correspondant au seuil de plasticité, la matière stocke l'énergie de déformation ; autrement dit, elle présente des propriétés élastiques et se comporte comme un solide. Dès que le seuil de plasticité est dépassé, le liquide peut s'écouler comme un liquide newtonien, on dit alors que c'est un liquide plastiqué de Bingham «**Fig.II.6**», ou bien, il peut s'écouler comme un fluide rhéofluidifiant, dans ce cas, il s'agit d'un liquide viscoplastique.

### II.3.4. Les fluides thixotropes

On appelle fluides thixotropes les fluides rhéofluidifiants dont la viscosité diminue non seulement lorsque le taux de cisaillement augmente, mais également en fonction du temps avec un taux de cisaillement constant. Le comportement des fluides thixotropes est étudié dans un test de bouclage. Au cours de ce test, la matière est soumise à des taux de cisaillement croissants, suivis des mêmes taux de cisaillement en ordre décroissant.

Le comportement thixotrope dépendant du temps est caractérisé par la différence entre la viscosité ascendante et la viscosité descendante, et les courbes de contrainte de cisaillement. Pour récupérer sa structure, la matière doit reposer pendant un certain temps, qui lui est spécifique. Ce type de comportement se manifeste dans tous les systèmes gélifiants.

### II.3.5. Les fluides antithixotropes

Les fluides antithixotropes sont des systèmes rhéoépaississants, c'est-à-dire des fluides où la viscosité augmente avec le taux de cisaillement, mais également en fonction du temps avec un taux de cisaillement constant. Le comportement de ces fluides est étudié généralement dans un test de bouclage, comme pour les fluides thixotropes.

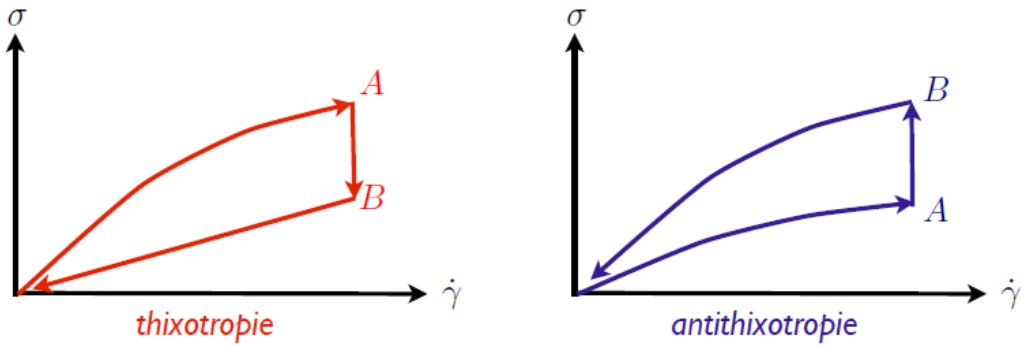


**Fig.II.8.** Courbe d'écoulement (la contrainte en fonction du taux de cisaillement) pour un fluide thixotropique et antithixotropique.

## II.4.Les modelés de comportement d'écoulement «équations rhéologiques»

Il existe plusieurs modèles pour décrire mathématiquement le comportement des fluides non newtoniens, tels que: **Herschel-Bulkley**, **Bingham** et **Eyring Carreau**…etc. Les modèles susceptibles de représenter les matériaux énergétiques sont résumés dans le tableau suivant :

**Le tableau.II.1.** Les différentes équations rhéologiques.

| **Le modèle** | **Equation** | **Paramètres** |
|---|---|---|
| **Newtonien** | $\boldsymbol{\tau = \mu * \dot{\gamma}}$ | $\boldsymbol{\mu} = constante$ «viscosité absolue» |
| **Bingham « fluide plastique »** | $\boldsymbol{\tau = \tau_0 + \mu_p * \dot{\gamma}}$ | $\boldsymbol{\tau_0}$ **:** la contrainte seuil.<br>$\boldsymbol{\mu_p}$: viscosité plastique |
| **Ostwald « fluide pseudo-plastique ou loi de puissance »** | $\boldsymbol{\tau = K * \dot{\gamma}^n}$**,**<br>**Ou :**<br>$\boldsymbol{\mu = K * \dot{\gamma}^{n-1}}$ | **k** : indice de consistance « dynes.sec$^n$/cm$^2$ ou en lb.sec$^n$/100 ft$^2$ ».<br>**n** : est connu comme l'indice de la loi puissance ou indice de comportement rhéologique il est sans dimension. |
| **Herschel-Bukley** | $\boldsymbol{\tau = \tau_0 + K * \dot{\gamma}^n}$ | **n** : est un indice de structure 0< n < 1.<br>**k** : est un indice de consistance « dynes.sec$^n$/cm$^2$ ou en lb.sec$^n$/100 ft$^2$ ». |
| **Cross** | $\boldsymbol{\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty)/(1 + (c\,\dot{\gamma})^m)}$ | $\boldsymbol{\mu_0}$ : est la viscosité au cisaillement zéro.<br>$\boldsymbol{\mu_\infty}$ : est la viscosité à l'infini de cisaillement.<br>**m** : est connu sous le nom « Cross » c'est un constant du taux, il est sans dimension.<br>**C** : est le constant du temps de Cross. |
| **Carreau** | $\boldsymbol{\tau = \left[\mu_\infty + (\mu_o - \mu_\infty) * \left[1 + (\dot{\gamma} * \lambda)^2\right]^{\frac{n-1}{2}}\right] * \dot{\gamma}}$ | $\boldsymbol{\mu_0}$ : est la viscosité au cisaillement zéro.<br>$\boldsymbol{\mu_\infty}$ : est la viscosité à l'infini de cisaillement.<br>$\boldsymbol{\lambda}$ : est le constant du temps.<br>**n** : est l'indice de puissance. |

## II.5.Viscoélasticité

Le caractère viscoélastique est un comportement non-Newtonien très fréquent dans les solutions de polymères. Le mot viscoélastique veut dire l'existence simultanée des propriétés visqueuses et élastiques, c'est-à-dire la réponse du fluide à une déformation présente à la fois un aspect élastique (contrainte proportionnelle à la déformation) et un aspect visqueux (contrainte proportionnelle à la vitesse de déformation). Dans le premier cas, le temps caractéristique de la sollicitation est inférieur à un temps caractéristique du matériau, les composants élémentaires n'ont pas le temps de se déformer de manière importante et on observe une réponse élastique. Lorsque le temps de sollicitation est plus grand que le temps caractéristique du matériau, la réponse est de type visqueux.

**II.5.1.Cisaillement oscillatoire :**

Dans un écoulement de cisaillement oscillatoire, on applique une déformation (ou une contrainte) sinusoïdale de pulsation **ω** constante. On mesure une contrainte(ou une déformation) elle est même sinusoïdale de pulsation **ω** dans la mesure où l'amplitude de la sollicitation est faible. Si la déformation est de la forme : $\boldsymbol{\gamma = \gamma_0 e^{i\omega t}}$ **(II.10)**

La réponse en contrainte s'écrit, dans le demain linéaire : $\boldsymbol{\tau = \tau_0 e^{i(\omega t+\delta)}}$ **(II.11)**

- **δ** est l'angle de perte.

Le modèle de cisaillement complexe est défini par :

$$\boldsymbol{G^* = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} e^{i\delta} = \frac{i\omega\tau_M G}{1+i\omega\tau_M} = G' + iG''} \quad \textbf{(II.12)}$$

$$\boldsymbol{G' = \frac{G\omega^2\tau_M^2}{1+\omega^2\tau_M^2} = \frac{\eta\omega^2\tau_M}{1+\omega^2\tau_M^2}} \quad \textbf{(II.13)}$$

$$\boldsymbol{G'' = \frac{G\omega\tau_M}{1+\omega^2\tau_M^2} = \frac{\eta\omega}{1+\omega^2\tau_M^2}} \quad \textbf{(II.14)}$$

$$\boldsymbol{\eta^* = \frac{\tau_0 e^{i(\omega t+\delta)}}{\gamma_0 i\omega e^{i\omega t}} = \frac{\tau_0 e^{i\delta}}{i\omega\gamma_0} = \frac{1}{i\omega} G^*} \quad \textbf{(II.15)}$$

- **G'** est le module de conservation et il caractérise la réponse en phase avec la déformation, Il est associe à la réponse élastique;
- **G"** est le module de perte. Il est en quadrature de phase avec la déformation et caractérise la réponse visqueuse;
- $\boldsymbol{\eta^*}$ est la viscosité complexe.

## III.1.Les argiles

De façon générale, une argile est un composé naturel sous forme de poudres dont les grains ont des tailles micrométriques. Ce composé possède des propriétés plastiques quand il contient suffisamment d'eau, ou au contraire devient dur lorsqu'il est sec.

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés (il s'agit généralement de silicates d'aluminium, mais parfois de silicates de magnésium), qui se différencient par l'arrangement de leurs couches tétraédriques et octaédriques **«Fig.III.1»** et appartenant à la famille des phyllosilicates. Les phyllosilicates appelés également silicates lamellaires [Le Pluart (2002)] dans lesquels les tétraèdres de $SiO_4$ forment des feuillets qui sont condensés avec des octaèdres d'oxydes métalliques dans un rapport 2:1 ou 1:1.

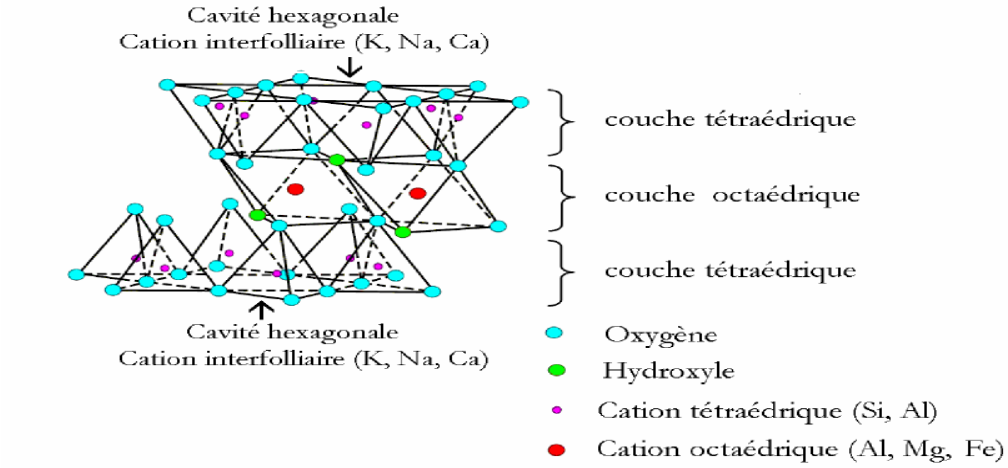


**Fig.III.1.** Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1 [Luckham et Rossi (1999)].

L'organisation structurale des phyllosilicates est basée sur une charpente d'ions $O^{2-}$ et $OH^-$ [Caillèreet al. (1982)]. Ces anions occupent les sommets d'assemblages octaédriques ($O^{2-}$ et $OH^-$) et octaédrique $O^{2-}$. Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de taille variables ($Si^{4+,}$ $Al^{3+}$, $Fe^{3+}$, $Fe^{2+}$, $Mg^{2+}$) en position octaédrique ou tétraédrique.

### III.1.1.Classification des argiles

Les minéraux argileux sont construits à partir de deux structures de bases simples :

#### III.1.1.1.Couche octaédrique

Cette structure est composée de deux feuillets d'oxygènes ou d'hydroxyles compacts dans lesquels des ions d'aluminium, fer ou magnésium sont incrustés dans une structure octaédrique.

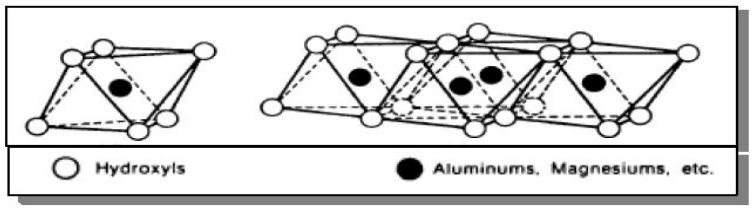


**Fig.III.2.** Structure laminaire des unités octaédriques (Eslinger et Peaver 1988).

#### III.1.1.2.Couche tétraédrique

Dans chaque couche tétraédrique, un atome de silice se trouve au centre d'un tétraèdre, à équidistance des 4 atomes d'oxygène ou d'hydroxyle, s'il est nécessaire d'équilibrer la structure, les groupes tétraédriques de silice sont disposés en un réseau hexagonal qui se répète à l'infini pour former un feuillet de la composition $Si_4O_6(OH)_4$.

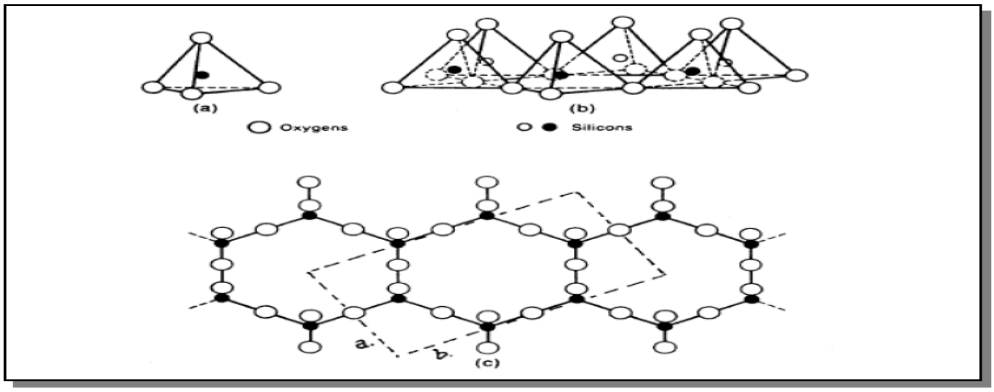


**Fig.III.3.** Structure tétraédrique (Eslinger et Peaver 1988).

❖ On trouve dans les littératures différentes classifications des argiles :

- La combinaison de feuillets.
- Le type de la couche.
- Le type de cation dans l'octaèdre.
- Le type de matériel dans l'espace interfolier.

Mais la plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. On distingue quatre groupes [Jozja (2003)]:

- les minéraux à 7 Å dont le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique de type 1:1 (T:O),
- les minéraux à 10 Å dont le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique de type 2:1 (T:O:T),
- les minéraux à 14 Å dont la particule est constituée de l'alternance de feuillets (T:O:T) et de couches octaédriques interfoliaires,
- les minéraux interstratifiés dont l'épaisseur de la particule est variable.

Parmi, les quatre groupes, nous pouvons citer:

- **La Kaolinite 7 Å /1:1 (T:O)**

Dont le feuillet est toujours neutre, dioctaédrique et alumineux de composition $(Si_2)(Al_2)O_5(OH)_4$ par demi-maille [Pédro (1994)]. Morphologiquement, elle se présente sous forme de particules hexagonales constituées par des empilements de feuillets [Jozja (2003)].

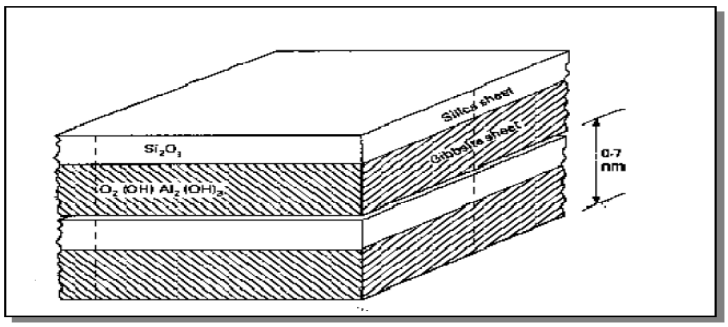


**Fig.III.4.** Représentation de la Kaolinite 1:1.

- **Les smectites 14 Å/2:1 (T:O:T)**

Ce type de phyllosilicate est constitué des deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique **Fig.III.5.** Les minéraux les plus importants de cette famille sont la montmorillonite (ou bentonite), la beidellite, l'hectorite et la saponite. Cette famille d'argile est composée de particules plates d'une grande extension latérale avec des diamètres allant de quelques microns à plusieurs centaines de microns. Ces particules sont elles-mêmes constituées d'un empilement de feuillets unitaires, formant spatialement une structure de type "jeu de cartes".

L'épaisseur totale du feuillet et de l'espace interfeuillet associé est d'environ 14 Å [Viallis-Terrisse (2000)]. Des molécules d'eau sont susceptibles de s'intercaler dans l'espace interfoliaire. Le degré d'hydratation dépend de la nature du cation hydraté et de l'humidité relative. Cette possibilité de "gonflement" des espaces interfoliaires conduit à désigner ces argiles par le terme "argiles gonflantes".

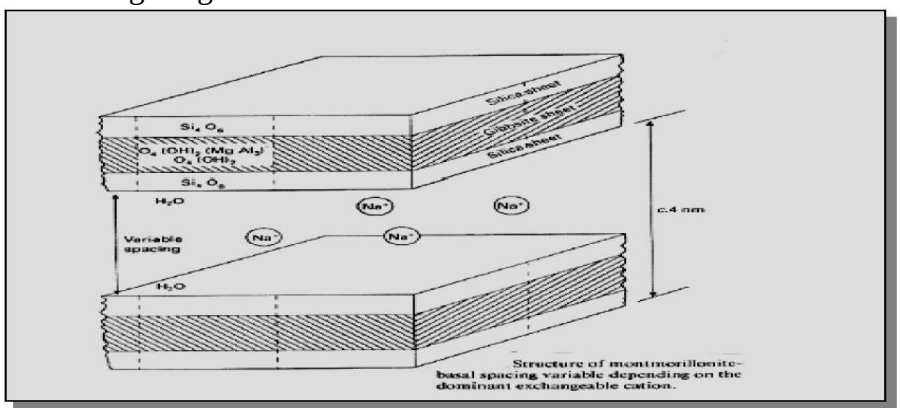


**Fig.III.5.** Représentation de la smectite (White 1999) 1:1.

- **L'illite 10 Å/2:1 (T:O:T)**

Comme les smectites, cette famille est aussi un phyllosilicate 2:1. Les feuillets possèdent une charge globale négative, plus élevée que celle des smectites, qui est compensée par des ions de potassium. La différence fondamentale avec les smectites réside dans le fait que les ions compensateurs (potassium) ne sont que très faiblement échangeables «l'illite a une capacité d'échange cationique faible». Il n'y a pas d'hydratation des espaces interfoliaires [Jozja (2003), M'bodj*et al.* (2004)].

### III.1.2.Propriétés des argiles

Les minéraux argileux se caractérisent par trois propriétés principales :

- Leur forme et leur surface spécifique.
- Leur capacité d'adsorption d'eau et de gonflement.
- Leur multiple possibilité d'échanges ioniques.

#### III.1.2.1.Forme et surface spécifique

Les argiles se présentent sous trois formes :

- En flocons, caractérisés par même dimension dans les deux directions et une épaisseur équivalente à 1/20$^{éme}$de la longueur.
- En latte, avec une dimension plus longue, épaisseur toujours équivalente à 1/20$^{éme}$ de la longueur.
- En aiguilles, deux dimensions identiques et la 3$^{éme}$ beaucoup plus grande.

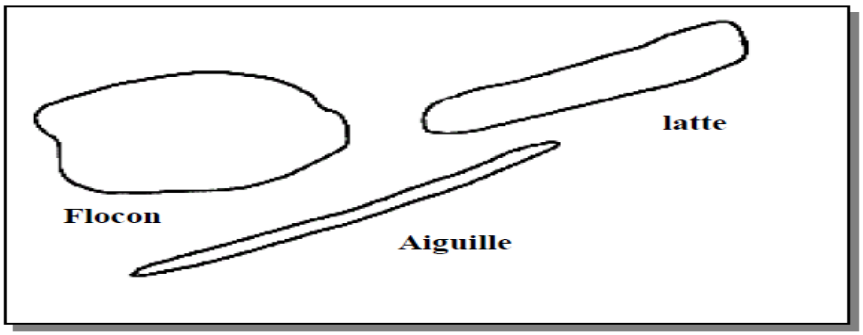


**Fig.III.6.** Forme des particules argileuses (Velde, 1995).

Les argiles sont définies depuis le XIX siècle comme des minéraux de petite taille. Ces minéraux ne sont donc pas identifiables au microscope optique. La fine taille des argiles leur confère une surface importante par rapport au volume des particules. La surface relative augmente avec la diminution du diamètre. Le rapport épaisseur/largeur est de l'ordre de 20 pour les argiles. Les propriétés des argiles sont principalement contrôlées par leur surface.

Le tableau « **III.1** » donne les valeurs caractéristiques des surfaces des grandes familles argileuses. La surface totale comprend la surface externe, comprise entre les particules argileuses, et la surface interne, correspondant à l'espace interfoliaire «**Fig.III.7**».

**Tableau III.1.** Surface spécifique des particules argileuses (Eslinger et Peaver 1988).

| Type d'argile/surfac spécifique ($m^2/g$) | Interne | Externe | Total |
|---|---|---|---|
| **Smectite** | 750 | 50 | 800 |
| **Vermiculite** | 750 | 1 | 750 |
| **Chlorite** | 0 | 15 | 15 |
| **Kaolinite** | 0 | 15 | 15 |
| **Illite** | 5 | 25 | 30 |

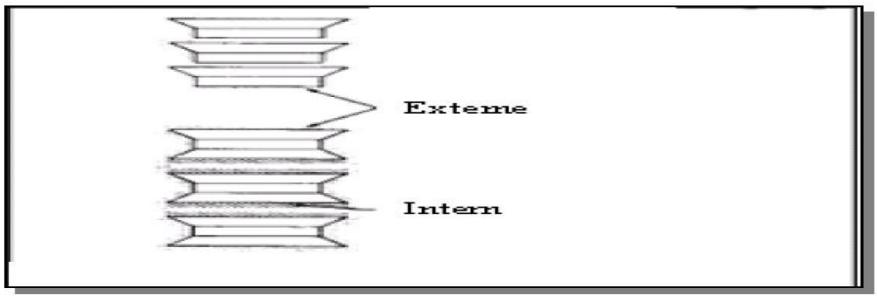


**Fig.III.7.** Surface des particules argileuse.

### III.1.2.2.Capacité d'adsorption et de gonflement

#### III.1.2.2.1.Degré d'hydratation

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau **«Fig.III.8.»** Cette eau modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées gonflantes. Les smectites, vermiculites et les minéraux interastratifiés offrent des capacités d'expansion beaucoup plus importantes que celles des autres espèces argileuses.

Les minéraux gonflants ont une structure de base de 10 **Å**.

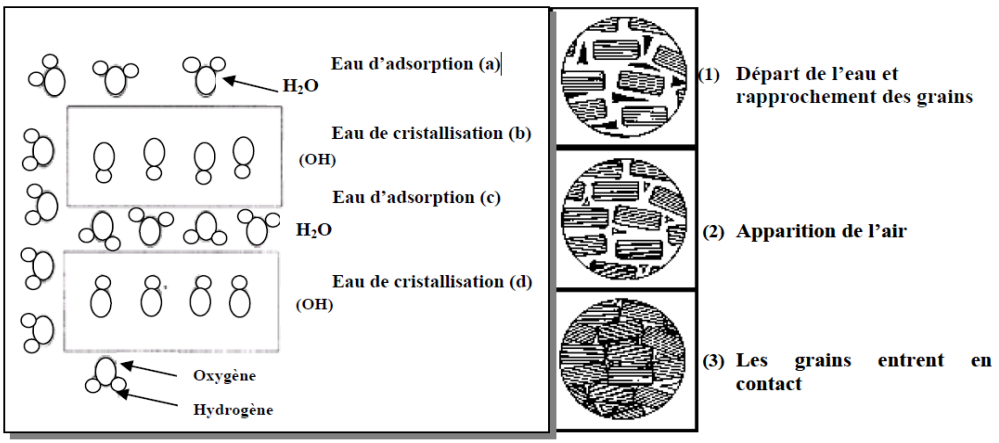


**Fig.III.8.** Localisation de l'eau dans les particules argileuses (Velde, 1995).

### III.1.2.2.2.Surfaces argileuses

Les minéraux argileux se caractérisent par une surface électrique non neutre. Il existe deux types de charge :

- Une charge permanente ou structurale liée aux substitutions ioniques de signe négatif.
- Une charge de surface variable selon le pH du milieu, liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux ou suite à l'adsorption de surfactant, de signe positif ou négatif.

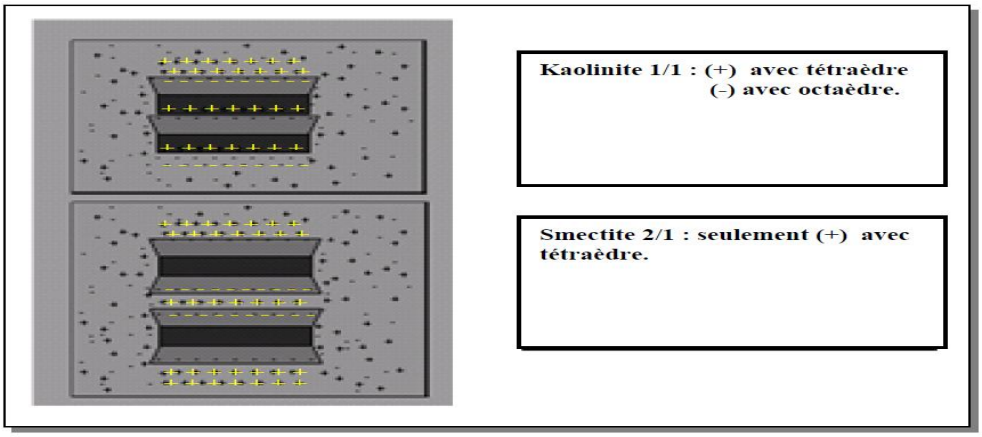


**Fig.III.9.** Adsorption à l'équilibre (Schroeder, 2002).

La charge de surface est liée à l'hydrolyse de liens rompus Si-O et Al-OH, le long des surfaces. A faible pH, l'argile se caractérise par une capacité d'échange anionique, $H^+$ se lie plus par rapport à $OH^-$, une charge positive se développe, à fort pH, une capacité d'échange cationique CEC se développe, les $OH^-$ se lient d'avantage que $H^+$ et une charge négative se développe «**Fig.III.10.**».

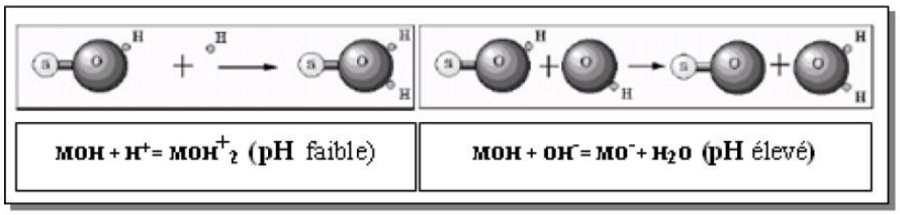


**Fig.III.10.** Rôle de pH sur l'adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002).

### III.1.2.3.L'échange cationique

Dans le cas des argiles, la charge de surface résulte des substitutions isomorphes même au sein des feuillets, et cette charge est fixée, elle peut être modifiée par différents cations compensateurs. Ainsi, si la solution contient ces cations spécifiques, la charge de surface est susceptible d'évoluer. Toutefois, plus la capacité d'échange cationique de l'argile est grande, plus les cations compensateurs sont mobilisables, et l'on reste alors dans une configuration de type charge fixe. On parle généralement pour les argiles, notamment les argiles gonflantes qui possèdent une CEC élevée, de la charge de surface plutôt que l'éventuel potentiel de surface.

**Tableau. III.2.** Surface spécifique et CEC de quelques minéraux argileux.

| Minéral | Surface interne ($m^2/g$) | Surface externe ($m^2/g$) | Surface totale ($m^2/g$) | C.E.C. (milliéquivalent/100g) |
|---|---|---|---|---|
| kaolinite | 0 | 10-30 | 10-30 | 5-15 |
| illite | 20-55 | 80-120 | 100-175 | 10-40 |
| smectites | 600-700 | 80 | 700-800 | 80-150 |
| vermiculite | 700 | 40-70 | 760 | 100-150 |
| chlorite | - | 100-175 | 100-175 | 10-40 |

### III.1.3.La bentonite

Pour nos travaux expérimentaux, nous avons utilisé une bentonite constituée principalement de montmorillonite. Le terme bentonite a été employé en premier par Knight (1898) pour décrire une argile plastique fortement colloïdale et fortement gonflante de la région de Fort Benthon au Wyoming, Etats-Unis d'Amérique. Ce terme a ensuite été étendu aux matériaux naturels dont la composition et les propriétés sont dominées par les smectites.

### III.1.3.1.Microstructures de la bentonite

Comme la bentonite est principalement constituée de montmorillonite, nous focaliserons notre bibliographie sur la montmorillonite. Dans les montmorillonites, on trouve trois niveaux d'organisation. Nous avons repris sur «**Fig.III.11**» à présentation des différents niveaux d'organisation selon l'échelle d'observation proposée par [Pluart et al (2004)].

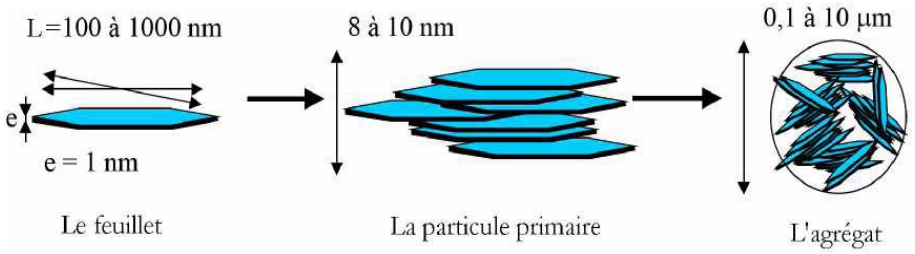


**Fig.III.11.** Structure multi-échelle de la montmorillonite [Le Pluart et al. (2004)].

#### III.1.3.1.1.Le feuillet

Les feuillets sont les unités structurales de base. Ils sont caractérisés par : la nature minéralogique, l'appartenance au type d'argile, les propriétés physico-chimiques ainsi que le comportement macroscopique. Le feuillet représente la répétition horizontale de la demi-maille dans les directions x et y. Il est assimilable à un disque ou à une lamelle, possédant des dimensions latérales de l'ordre du micron, et faisant à peu près un nanomètre d'épaisseur. Ces plaquettes sont considérées comme souples et relativement déformables. Les feuillets sont composés essentiellement des atomes de silicium, oxygène, aluminium et magnésium. Macroscopiquement, l'argile forme une structure atomique neutre. Mais microscopiquement, des substitutions peuvent se produire aléatoirement dans les feuillets: en remplaçant, par exemple, certains aluminiums par des atomes de charge inférieure comme par exemple le magnésium. Un déficit de charge du feuillet apparait et il est nécessaire d'insérer des cations compensateurs dans la structure, pour obtenir un composé neutre. Les cations compensateurs les plus communs pour la montmorillonite naturelle sont le sodium ($Na^{+}$) et le calcium ($Ca^{2+}$). Certaines impuretés, telles que du potassium, peuvent se trouver sous forme de traces dans ce composé.
La bentonite de notre étude est calcique et les cations compensateurs sont des calciums ($Ca^{2+}$).

#### III.1.3.1.2.La particule primaire

Les particules primaires constituent le premier niveau d'organisation. Elles sont caractérisées par un empilement de feuillets identiques parallèlement à leur plan de base. Les forces de cohésion entre feuillets sont plus faibles que celles existant au sein du feuillet. La structure de la particule observée dans un plan perpendiculaire au plan des feuillets peut se présenter suivant trois grands types d'empilement:

- Empilement ordonné où les feuillets sont empilés les uns sur les autres dans un ordre parfait. C'est le cas des phyllosilicates dont l'espace interfoliaire est vide ou anhydre (plutôt pour les kaolinites et les illites).

- Empilement semi-ordonné (ou désordre translationnel). Dans ce cas, les feuillets successifs sont semi-définis. Ils sont séparés par quelques molécules d'eau, l'épaisseur de la particule est variable et dépend du degré d'hydratation. Ils peuvent glisser latéralement les uns sur les autres.
- Empilement désordonné (ou désordre turbostratique). Dans ce cas, des feuillets successifs présentent des translations et/ou des rotations quelconques dans tout l'édifice. Les feuillets sont séparés par un film d'eau permettant une libre rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de la particule [Pons (1980), Pédro (1994)].

#### IV.1.3.1.3.L'agrégat

Un agrégat est un ensemble de particules primaire orientées dans toutes les directions. Les agrégats ont une taille qui varie de 0,1 à 10 microns comme il est montré sur «**Fig.III.11.**». Il s'agit d'un assemblage de particules dont l'arrangement est gouverné par le type de forces résultant des interactions entre particules (et du degré de compaction). En effet, lorsque les forces répulsives sont dominantes, les particules s'orientent parallèlement et la structure est dite « *dispersée* ». Les particules s'assemblent au sein d'agrégats, plus au moins dense selon la texture et le nombre de particules, ainsi que les distances entre celles-ci.

On en conclut que l'organisation de la microstructure de la bentonite (du feuillet à l'assemblage d'agrégats) ne peut être interprétée que si l'espace poreux est pris en considération. La dimension, la forme et la distribution des espaces poreux dépendent de la granulométrie de l'argile, de son caractère gonflant et aussi du fluide interstitiel et des contraintes auxquelles la bentonite est soumise. Touret et al. (1990) ont décrit l'existence de trois types d'espaces liés à l'organisation de la phase solide dans des argiles «**Fig.III.12.**».

- L'espace interfoliaire sépare deux feuillets dans un empilement. Il est généralement occupé par les couches d'eau adsorbée (1 à 4) et des cations échangeables, et son épaisseur moyenne est comprise entre 1,5 et 2,5 nm.
- L'espace interparticulaire sépare les particules argileuses qui forment les agrégats. Il est susceptible de diminuer jusqu'à atteindre la valeur de l'espace interfoliaire pour les argiles fortement compactées [Pusch (1982)].
- L'espace interagrégat sépare les agrégats. Il a une dimension moyenne comprise entre 1,6 et 16 nm où l'eau circule librement (eau libre) limitant les effets électrostatiques de la double couche.

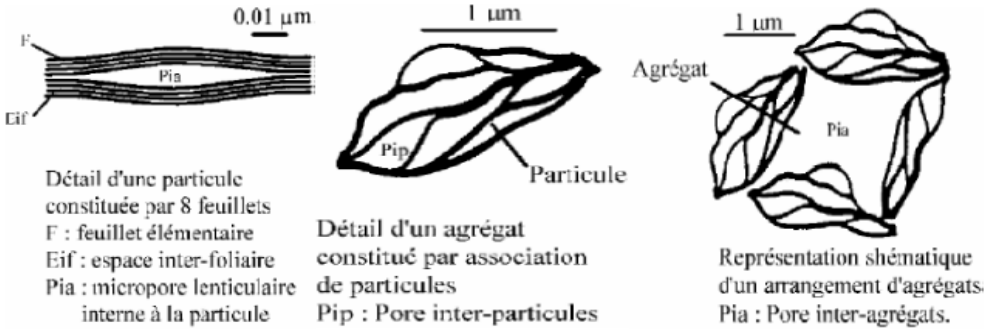


**Fig.III.12.** Les différents types d'espaces poreux [Touret et al. (1990)].

## III.2.Les polymères

L'utilisation des polymères dans les fluides de forage a commencé pour la première fois en 1937 lorsque l'on ajoute de l'amidon de maïs à la boue bentonique pour contrôler les caractéristiques de filtration.

L'utilisation initiale était d'accroître les propriétés d'un système simple à base d'argiles et de protéger la bentonite de floculation du sel. Les substances utilisées se produisaient naturellement ou étaient extraites par des procédés simples.

Depuis cette époque, les polymères utilisés sont devenus beaucoup plus sophistiqués et ils sont souvent conçus spécialement pour une situation de forage particulière. Dans certains cas, ils peuvent même remplacer totalement les argiles, particulièrement pour le forage des zones argileuses sensibles à l'eau ou des zones productrices d'eau et d'hydrocarbures.

### III.2.1.Structure fondamentale des polymères

Un polymère consiste en une unité de base (monomère) ou plusieurs unités chimiquement reliées entre elles (polymérisées) pour former une chaîne. Les unités peuvent être identiques ou radicalement différentes.

Après polymérisation, les groupes peuvent être modifiés chimiquement, un certain nombre de variations peuvent être visualisées à partir de ce schéma simple. Certaines sont énumérées ci-après :

- Type de monomère ou monomères,
- Nombre de monomères reliés pour former une chaine c'est-à-dire le poids moléculaire,
- Nombre de réticulations ou ramifications dans la chaîne,
- Type et ampleur des modifications chimiques ultérieures.

Les variations structurales les plus importantes des polymères sont :

- **Le poids moléculaire ou longueur de la chaîne**

Il peut varier par la limitation du nombre de groupes de fin de chaîne ou par la dégradation chimique de chaînes plus longues, un autre point important est la distribution des poids moléculaires.

- **Types de groupes réactifs.**

La réaction chimique dépend essentiellement du type des groupes qui sont attachés à la molécule et du nombre des groupes. Il y a souvent plus d'un type de groupes réactif. La distribution des groupes sur la chaîne du polymère affecte aussi les propriétés et la réactivité. Souvent, en raison de la nature complexe des polymères, on ne connaît pas les détails de la structure, mais les diverses conditions de la réaction peuvent produire des différences dans la structure qui peuvent influencer les performances du polymère**.** Les groupes qui peuvent être attachés aux polymères peuvent être divisés en trois catégories :

- Non ioniques,
- Anioniques ou chargés négativement,
- Cationiques ou chargés positivement.

Plus d'un type de groupes peuvent être présents dans la molécule. Les types de groupes sont donnés dans le «**Tableau III.3**». La nature de la charge de certains groupes dépend du pH du système, qui peut changer de non-ionique vers cationique ou anionique parce que les groupes sont respectivement faiblement basiques ou faiblement acides.

**Tableau III.3.** Groupes polaires

| Classe | Groupe | |
|---|---|---|
| | **Nom** | **Formule** |
| Non ionique | Hydroxyle<br>Liaison éther<br>Ester | -OH<br>R-O-R<br>$-O-CH_3$ |
| Anionique | OH phénolique<br>Carboxyle<br>Sulfonique<br>Phosphate | $C_6H_5OH$-$C_6H_5O^-$<br>COOH-$COO^-$<br>$-SO_3H$- $-PO_3^-$ |
| Cationique | amine | $-NH_3$- $-NH_3^+$ |

- **Hydratation et forme finale de polymère**

La forme finale de polymère après l'hydratation dépend des facteurs suivants :

- Ramifications ou réticulations dans la structure.
- Concentration et types des groupes de molécules.
- pH de la solution, changeant le caractère ionique des molécules, et par conséquent, les forces de répulsion et d'attraction entre les molécules.
- Les ions multivalents peuvent agir comme des agents de liaison par réaction ou par complexification avec plus d'un groupe chargé de la molécule. La liaison peut réduire la solubilité et la viscosité. Le degré de la réaction dépend de la concentration des ions multivalents et du pH de la solution.
- La teneur ionique ou en sel et son effet sur la répulsion électrostatique entre les charges. L'effet sur un polymère chargé négativement est de changer la configuration étirée en eau douce (où les charges de répulsion étirent la molécule) en une structure semblable à une bobine compacte dans une solution saline où les forces de répulsion sont plus faibles. le changement de la forme moléculaire modifie les propriétés du polymère dans la solution. On peut voir que le polymère présente une surface moindre à l'eau ou aux autres molécules de polymères. Ces réactions étant à l'origine du développement des propriétés visqueuses, on comprendra qu'une augmentation du sel réduira la viscosité d'un polymère chargé.

### III.2.2.Effet de la température sur la rhéologie du polymère

Pour une température bien au-dessus du point de fusion $T_m$, le polymère est un liquide avec une viscosité mesurée. Il est possible d'observer les forces normales dans une déformation simple et aussi relativement une viscosité extensionnelle assez haute, ce qui indique que le polymère est viscoélastique. Dès que la température est réduite, la viscosité augmente rapidement et l'élasticité devient plus évidente. Plus encore la température est réduite, certains polymères cristallisent. Le point de cristallisation est appelé le point de transition, ce point est l'entrée de la phase transitoire pour les polymères cristallisants, le Polyéthylène est un exemple de polymères cristallisants. Certains polymères ne cristallisent pas mais ils continuent d'augmenter la viscosité pour former finalement un verre. Le polystyrène est un exemple de polymères non cristallisants, la phase transitoire de ces polymères est assez difficile à déterminer et elle dépende de la méthode de mesure.

**Tableau III.4.** Température de transition pour les différents polymères.

| Type | Point de fusion $T_m$ (°C) |
|---|---|
| Polyéthylène à densité élevée HDPE. | 140 |
| Polypropylène Isotactique PP | 165 |
| Polyéthylène Téréphtalate PET | 265 |
| Nylon-66 | 265 |

### III.2.3.Les fonctions et les caractéristiques principales des polymères dans les fluides de forage

Le «**Tableau III.5**» résume des relations entre les fonctions d'un polymère dans un fluide de forage et ses structures générales.

**Tableau III.5.** Les relations entre les fonctions d'un polymère dans un fluide de forage et ses structures générales.

| Fonction | Caractéristique principales |
|---|---|
| Viscosité | Poids moléculaire élevé. |
| Viscosité et gélation | Poids moléculaire élevé et structure à haute ramification ou agent de réticulation. |
| Viscosité dans les solutions salées | Poids moléculaire élevé et types non ioniques ou anionique à haute substitution. |
| Défloculation, dispersion, ou fluidification | Poids moléculaire faible, chargé négativement à des valeurs de pH alcalines. |
| Floculation | Poids moléculaire élevé avec groupes chargés pour adsorption aux argiles. |
| Surfactant | Groupe hydrophobe et groupes hydrophiles sur la même molécule. |
| Additif de filtrat | Particules à forme colloïdale. |

### III.2.3.1.Les viscosifiants

Les propriétés visqueuses conférées à l'eau par la solution d'un polymère sont dues aux interactions eau/polymère et polymère/polymère. Plus les molécules sont longues, plus il est difficile de séparer les molécules les unes des autres et plus elles deviennent enchevêtrées. Ces forces qui engendrent la viscosité peuvent être interrompues par l'apport d'énergie ou de cisaillement. Il en résulte que plus le taux de cisaillement est élevé, plus la viscosité est faible. Les solutions qui ont un tel comportement sont dites fluidifiants par cisaillement. Ceci est le comportement d'écoulement idéal pour les fluides de forage du fait qu'une basse viscosité est nécessaire dans les zones à taux de cisaillement élevé près de l'outil et des viscosités plus élevées sont nécessaire dans les zones à taux de cisaillement plus faible dans l'espace annulaire, pour transporter les déblais vers la surface.

### III.2.3.2.Les défloculants

Les défloculants ou fluidifiants dans les systèmes à base d'argiles alcalines, permettent d'obtenir généralement des résultats par adsorption du polymère chargé négativement sur plaquettes d'argiles, neutralisant ainsi les charges positives et créant une charge négative globale. Ainsi, les fluidifiants sont caractérisés par leur charge négative et leur poids moléculaire faible. Si le polymère est trop long, il liera les particules entre elles et manifestera une action de floculation.

### III.2.3.3.Les floculants

Les floculants sont principalement caractérisés par un poids moléculaire élevé, ce qui permettra au polymère de former des liaisons de particule à particule. Les molécules de groupe ionique peuvent adsorber plus fortement sur les sites ioniques et ainsi floculer de façon plus efficace.

### III.2.3.4.Les surfactants :

Les surfactants sont des polymères dans lesquels chaque molécule contient deux assemblages d'atomes ou groupes. Un groupe est polaire s'il est attiré vers les surfaces polaires «telle que l'eau» il est appelé hydrophile. L'autre est non polaire hydrophobe. La nature de surfactant est liée au type de groupe hydrophobe ou hydrophile et à la combinaison des groupes. Quand les groupes sont polymériques, une famille complète de molécules peut être produite avec un équilibre entre les groupes hydrophobes et hydrophiles changeant progressivement de série en série.

### III.3.Interactions particulaires

Lorsque deux molécules neutres s'approchent l'une de l'autre, différentes interactions entre les électrons et noyaux d'une molécule et les électrons et noyaux de l'autre molécule génèrent une énergie potentielle d'interaction. À des très grandes distances de séparation entre les molécules là où il n'y a pas d'interaction on peut arbitrairement définir l'énergie potentielle du système à zéro. Lorsque les molécules s'approchent l'une de l'autre, des interactions de différentes natures se font sentir (attractives et/ou répulsives) de sorte que l'énergie potentielle d'interaction est non nulle. Par convention l'énergie d'interaction attractive est négative et l'énergie d'interaction répulsive est positive. L'énergie d'interaction totale est donnée par la somme des toutes les contributions, interactions attractives et répulsives. La nature des différentes forces intervenant peut être diverse (Van Der Wall, électrostatique, etc.).

### III.3.1.Mécanisme de floculation

On dit d'un système qu'il est floculé lorsqu'il existe des forces d'attraction nettes entre les particules et que celles-ci peuvent s'associer entre elles.

Il existe un certain nombre de mécanismes qui permettent soit d'augmenter les forces d'attraction entre les particules soit de réduire les forces de répulsion. Un taux élevé de sel réduit l'épaisseur de la couche diffusée, la réduction de l'épaisseur tient à la concentration en sel et à la valence des ions de charges opposées. Ainsi le chlorure de calcium comprimera plus efficacement la double couche que le chlorure de sodium, car un cation soluble ayant plus d'une charge positive peut réagir avec plus d'un lieu d'échange des surfaces.

### III.3.2.Mécanisme de défloculation

On qualifie de « défloculé » le système de particules en suspension, quand il existe une force générale de répulsion entre les particules, ce que l'on obtient normalement en créant les conditions où les particules possèdent la même charge. Afin de maximiser la répulsion électrostatique, la concentration d'électrolyte doit être aussi faible que possible.

### III.3.3.Interactions argile- polymère-eau

#### III.3.3.1.Interactions argile-eau

Les surfaces des argiles contiennent des groupes d'hydroxyles et d'oxygènes qui forment des liaisons d'hydrogène avec des molécules d'eau. Les cations échangeables adsorbés à la surface de l'argile auront également une enveloppe de molécules d'eau en association étroite, de plus l'eau formera une liaison avec les sites négatifs des bords. Ces interactions se combinent afin de créer une zone de 10 à 15 couches d'eau en association étroite avec l'argile créant ainsi l'enveloppe d'hydratation. Ainsi, l'introduction des argiles dans l'eau réduit le volume d'eau libre.

#### III.3.3.2.Interactions polymère-eau

De même que pour les argiles, les polymères à poids moléculaire élevé solubles dans l'eau créent une gaine d'eau en association étroite autour de chaque molécule.

#### III.3.3.3.Interactions argile-argile

Elle existe une interaction entre les particules d'argiles en termes d'attraction nette ou répulsion entre les particules dans des états soit des floculations soit de défloculation respectivement.

#### III.3.3.4.Interactions polymère-argile

Les réactions entre argiles et polymères dépendent d'un certain nombre de facteurs :

- **Poids moléculaire du polymère**

Il y a une relation directe entre le poids moléculaire et la longueur de la molécule d'un polymère. Une substance à poids moléculaire élevé comme le polyacrylate synthétique a une longueur de chaîne d'environ 20 microns qui peut être beaucoup plus importante que les particules d'argiles. Ainsi, une molécule peut adsorber plus d'une particule d'argile et donc former une association entre les particules d'argile. Par conséquent les polymères à poids moléculaire élevé agissent en tant que floculants. Les polymères à poids moléculaire faible peuvent modifier la charge des particules d'argiles individuelles de façon à ce qu'elles aient une charge égale et qu'elles soient défloculées.

- **Adsorption de polymère sur l'argile**

L'adsorption est un phénomène physique de fixation des constituants d'une phase liquide ou gazeuse sur une surface solide. Dans le cas de l'adsorption de polymère par les surfaces de particules argileuses, les macromolécules s'adsorbent généralement par segments de chaînes appelés « trains ». Entre deux trains consécutifs, ces macromolécules forment une «boucle». Le segment de chaine situé avant le premier train ou après le dernier est appelé «queue» «**Fig.III.13**» [De Gennes 1987 ; Mongondry 2003]. Les études d'adsorption montrent que les mécanismes qui gouvernent l'adsorption sont spécifiques à la nature de la macromolécule adsorbée, ainsi qu'à la nature de la particule adsorbante. De façon générale, les polymères s'adsorbent par des interactions de type : Van Der Waals, électrostatiques, hydrophobes ou par la création de liaison hydrogène [Israelachvili 1992 ; Tadros 2003].

*Schéma des différentes séquences d'un polymère adsorbé sur une surface argileuse.*

*Mécanisme de floculation*

*Mécanisme de défloculation*

**(A)** **(B)** **(C)**

**Fig.III.13.** Schéma représentant les mécanismes d'adsorption des polymères sur les argiles.

### III.3.3.5.Interactions polymère-polymère

En plus des réactions polymères avec les argiles, il y a également des interactions entre les polymères par un mécanisme d'enchevêtrement d'autant plus prononcé que les chaînes sont longues. Ainsi, à poids moléculaire élevé les polymères ont des viscosités plus élevées que les polymères plus courts ou à poids moléculaire faible. Pour des solutions plus concentrées, des enchevêtrements de molécules apparaissent, et les interactions polymère-polymère deviennent prédominantes. Dans ce cas, la solution est dite semi-diluée. Lorsque les polymères sont de même nature, on aura plutôt des répulsions par l'effet stérique. Les polymères se repoussent et s'excluent mutuellement de l'espace qu'ils remplissent. Dans le cas contraire, les interactions sont essentiellement attractives et les polymères s'attirent mutuellement et s'attachent entre eux.

### III.3.4.Rappel sur les colloïdes

Toutes les particules en suspension sont soumises à deux forces :

- Force gravitaire : fonction de la masse c'est-à-dire de la densité et surtout du volume.
- Force électrostatique de répulsion entre les particules chargées.

Quand la taille des particules diminue le rapport force électrostatique/force gravitaire diminue en fonction de l'inverse du rayon. Quand le rayon diminue, il arrive un moment où les forces électrostatiques sont plus fortes que les forces gravitaires, il ne peut plus y avoir de décantation, ce qui donne un système de colloïde.

## IV.1.Méthodes de mesure et matériaux

Nous voulons étudier le comportement et les caractéristiques des fluides de forage composés essentiellement de bentonite et d'additifs. Mais comment mesurer, en pratique, la viscosité de cisaillement d'un fluide? Comment mesurer ses contraintes? Comment mesurer les effets thixotrope du fluide? Comment obtenir ses propriétés viscoélastiques? Comment analyser les mesures expérimentales? Dans ce chapitre, nous exposons les techniques utilisées qui nous permettent d'apporter une réponse à toutes ces questions.

### IV.1.1.Méthodes de mesures

#### IV.1.1.1.Mesures de poids des suspensions

Nous avons mesuré le poids de nos échantillons de suspensions au moyen d'une balance digitale hermétique de précision $10^{-2}$ g de type «KERN 440-33».

#### IV.1.1.2.Mesures de pH des suspensions

Nous avons mesuré le pH de nos suspensions à l'aide d'un pH-mètre, type «HANNA Instruments HI 22 11» avec thermomètre, ayant une précision de 0.01/unité de pH.

#### IV.1.1.3.Agitation

Nous avons agité nos suspensions à l'aide d'un agitateur magnétique, type «Wise Stir MS-MP8» de vitesse entre 80 ~ 1200 RPM.

#### IV.1.1.4.Mesures rhéologiques des suspensions

Pour mesurer les caractéristiques rhéologiques d'un fluide (viscosité, contraintes, etc.), on utilise un appareil de mesure appelé rhéomètre. Un rhéomètre mesure à la fois la contrainte et la déformation d'un fluide en fonction du temps.

Pour mesurer la viscosité de cisaillement "$\boldsymbol{\eta = \sigma / \dot{\gamma}}$", un rhéomètre peut appliquer la contrainte $\boldsymbol{\sigma}$et mesurer le taux de cisaillement $\boldsymbol{\dot{\gamma}}$(fonctionnement à contrainte imposée), ou vice versa (fonctionnement à taux de cisaillement imposé).

En réalité, le rhéomètre impose soit un couple, soit une vitesse de rotation. Le couple est proportionnel à la contrainte, et la vitesse de rotation est proportionnelle au taux de cisaillement, les deux coefficients de proportionnalité sont des caractéristiques de la géométrie utilisée (Couette cylindrique, cône-plan, plan-plan, etc.).

Le rhéomètre utilisé pour nos expériences est un rhéomètre à déformation imposée de type «Anton PaarPhysica MCR301», il a la géométrie de Couette cylindrique. Cette géométrie est composée de deux cylindres coaxiaux en rotation relative, le rayon intérieur est noté $R_i$ et le rayon extérieur $R_e$ (donc $R_e > R_i$). L'entrefer «e» est l'espace entre les deux cylindres ($e = R_e - R_i$),la hauteur du cylindre intérieur est notée h. Le cylindre extérieur fixe avec un fond «cup» en anglais, il s'agit donc d'un récipient cylindrique destiné à contenir le fluide et le cylindre intérieur tournant «bob» en anglais, le Couette cylindrique est donc parfois dénommé en anglais « bob and cup». «**Fig.IV.1**» représente une coupe du profil d'une géométrie de Couette cylindrique.

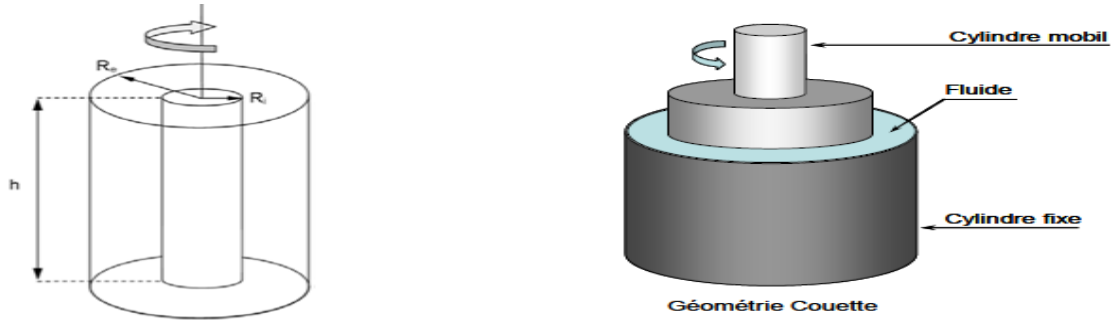


**Fig.IV.1.**Géométrie de Couette cylindrique.

Le couple C imposé par le rhéomètre sur le cylindre tournant vaut, «en notant la contrainte moyenne sur le cylindre intérieur $\sigma_i = \sigma(r = R)$» :

$$\boldsymbol{C = (distance * force) = R_i 2\pi R_i h \sigma_i} \quad \textbf{(IV.1)}$$

Soit :

$$\boldsymbol{\sigma_i = \frac{C}{2\pi h {R_i}^2}} \quad \textbf{(IV.2)}$$

Pour un entrefer faible (e = $R_e$- $R_i$<< 1), le système équivaut à un cisaillement entre deux plaques, et le taux de cisaillement $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ fonction de la vitesse angulaire de rotation **Ω**, s'écrit :

$$\boldsymbol{\dot{\gamma} = \frac{V_\theta}{e}} \quad \textbf{(IV.3)}$$

Soit

$$\boldsymbol{\dot{\gamma} = \frac{R_i \Omega}{R_e - R_i}} \quad \textbf{(IV.4)}$$

Les expressions ci-dessus sont utilisées pour étalonner le rhéomètre, dans une géométrie de Couette classique à entrefer faible, on détermine les constantes de proportionnalité entre la contrainte et le couple d'une part, le taux de cisaillement et la vitesse de rotation d'autre part, avec des ajustements pour tenir compte des effets de bord et des imperfections mécaniques du rhéomètre et/ou de la géométrie. En pratique, le constructeur du rhéomètre détermine les constantes de proportionnalité pour les géométries livrées avec l'appareil.

La viscosité «$\boldsymbol{\eta = \sigma/\dot{\gamma}}$» mesurée par le rhéomètre est donc une viscosité mesurée en supposant que l'entrefer est faible. En particulier, en faisant cette approximation, on a supposé un profil de vitesse linéaire dans l'expression du taux de cisaillement. De manière plus générale, pour un entrefer quelconque, il faut distinguer les fluides newtoniens et non newtoniens.Notons d'abord que, dans le cas général de la géométrie de Couette cylindrique, la contrainte σ dépend de r, donc la contrainte σ est hétérogène dans l'entrefer. Établissons cette dépendance parconservation du moment, on a :

$$\boldsymbol{2\pi R_i h \sigma_i R_i = 2\pi r \sigma(r) r} \quad \textbf{(IV.5)}$$

$$\boldsymbol{\sigma(r) = \frac{\sigma_i {R_i}^2}{r^2}} \quad \textbf{(IV.6)}$$

La contrainte $\boldsymbol{\sigma}$décroît en «1/$r^2$»dans l'entrefer. Le gradient de vitesse varie donc également dans l'entrefer, et le profil de vitesse n'est plus linéaire. Connaissant la variation de la contrainte dans l'entrefer dans un Couette cylindrique, il reste, pour calculer la viscosité du fluide, à déterminer le gradient de vitesse. Il faut pour cela connaître le profil de vitesse du fluide dans l'entrefer.

**Fig.IV.2.** Le rhéomètre «Anton Paar MCR 301».

**Tableau.IV.1.** Caractéristiques de rhéomètre utilisé dans ce mémoire.

| | |
|---|---|
| **Appareil** | Anton Paar MCR 301 |
| **Sollicitation dynamique** | Déformation |
| **Gamme de fréquence mesurable** | $10^{-5}$à 628 rad/s |
| **Gamme de température** | -150 à +1000 °C |
| **Gamme de couple** | 0.05µNm à 200mNm |
| **Gamme de forces normales** | 0.01N à50N |
| **Mesure temporelle** | Fonction de relaxation |
| **Atmosphère d'analyse** | air |

### IV.1.2.Matériaux

Nous avons étudié différentes suspensions sur une large gamme de température[25, 35, 45, 55 et 65C°]. Dans une première phase exploratoire, nous avons testé de nombreuses suspensions avant de fixer les paramètres de formulation de nos systèmes modèles.

Pour comprendre les interactions du complexe «la bentonite-PEO» dans le milieu aqueux, Il est indispensable de mener d'abord une étude de caractérisation des systèmes isolés avant d'entreprendre l'étude du système complexe.Nous avons formulé d'une part, les boues de forage douces (eau+bentonite) pour faire apparaître les caractéristiques rhéologiques telles que la contrainte seuil d'écoulement…etc., et d'autre part, les solutions de polymères (eau+PEO) de façon à apprécier qualitativement notre additif dans le milieu aqueux.

A partir d'une étude préliminaire sur l'influence de la température dans nos suspensions modèles, nous avons pu constater que le comportement rhéologique était modifié, nous choisissons de fixer la concentration en argile à 6%, qui d'ailleurs n'est pas loin en pratique dans les formulations des fluides de forage, ce qui nous permet d'avoir ainsi une réserve d'argile conséquente pouvant interagir avec les chaînes de polymère. Puis nous sommes focalisés sur l'étude du système ternaire «eau-bentonite-PEO».

A la fin, nous avons opté pour une formulation faisant apparaître les principales caractéristiques rhéologiques de la boue de forage et pour cela nous avons fixé la concentration en PEO à 0.50% pour le poids moléculaire 10000 g/mol.

#### IV.1.2.1.Le solvant«l'eau»

L'eau est un solvant naturel pour tous les polymères naturels. C'est un solvant particulièrement complexe dont les propriétés peuvent varier dans des proportions considérables si la préparation ne relève pas d'un protocole bien contrôlé.

L'eau que nous avons utilisée était distillée et son pH était de7.

**IV.1.2.2. La bentonite**

La bentonite que nous avons utilisée se présente sous forme d'une poudre minérale constituée essentiellement (environ 75%) d'argile montmorillonite (famille des smectites) et d'un faible pourcentage de kaolinite et d'illite avec un pourcentage du quartz. Elle est commercialisée par la société «SIGMA ALDRICH» et porte le code «285234-500G» et sa formule chimique est : $AL_2O_34SiO_2H_2O$,soit une masse molaire de 180.05g/mol. D'après les données du fabricant elle a un pH=9, une masse volumique de 2,4 g/cm$^3$, une surface spécifique 39,3 m$^2$/g et la capacité d'échange cationique 0,88 méq/g.

**Tableau.IV.2.**Composition chimique de la bentonite (285234-500G**)**.

| **Elément Chimique** | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Concentration massique(%)** | 48.35 | 12.15 | 8.26 | 6.68 | 5.47 | 3.65 | 2.39 |

**IV.1.2.3.Polyéthylène oxyde «PEO»**

Nous allons maintenant présenter le troisième élément de nos formulations: le polyéthylène oxyde. Notre polymère nous a été fourni par «Sigma Aldrich».

Le polyéthylène oxyde (PEO) est obtenu par polymérisation de l'éthylène oxyde.On fait réagir l'éthylène oxyde avec de l'eau. La réaction de polymérisation amorcée par un catalyseur acide ou basique :

$$HOCH_2CH_2OH + n(CH_2CH_2O) \rightarrow HO(CH_2CH_2O)_n+1H$$

Du fait de ce type de polymérisation, on obtient des distributions de masse moléculaire étroites. La formule chimique du PEO est de la forme suivante :

$$HO\text{-}CH_2\text{-}(CH_2\text{-}O\text{-}CH_2\text{-})_n\text{-}CH_2\text{-}OH$$

La masse du monomère $M_o$ est de 44,05 g/mol. Les unités d'éthylène ($CH_2$-$CH_2$) constituent les parties hydrophobiques du polymère et l'atome d'oxygène forme la partie hydrophile du PEO. Cet arrangement hydrophile, hydrophobe est responsable des propriétés particulières de ce polymère, et notamment de sa solubilité dans l'eau.

**IV.1.3.Le protocole de travaille**

**IV.1.3.1.Préparation des échantillons**

**IV.1.3.1.1.Préparation des suspensions de bentonite**

Des suspensions de bentonite de concentrations massiques de 6% ont été préparées en versant une masse d'argile de 6g dans l'eau déminéralisée du volume de 94 ml sous agitation de 450«RPM» pendant 24 heures. Après la préparation des fluides nous avons observé que les suspensions forment des gels après un repos de quelques heures.

**IV.1.3.1.2.Préparation des solutions aqueuses de PEO :**

Pour obtenir des solutions de PEO, nous avons versé une masse de polymère de 0.5g dans un volume de 99.5 ml d'eau déminéralisée. L'ensemble est agité pendant 24 heures à une température ambiante de 20°C.

**IV.1.3.1.3.Préparationdu mélange«eau-bentonite-PEO»**

Pour la préparation des mélanges «eau-bentonite-PEO», on a procédé comme suit : à la quantité d'eau distillée préfixée de 93.5 ml on a ajouté d'abord, intimement la masse de la poudre de bentonite préfixée à 6 g.

Après 7 heures d'agitation, lePEO de masse 0.5 g est introduit dans la suspension de base de bentonite. L'homogénéisation est obtenue par agitation pendant 17 heures de l'ordre de 450RPM.

**IV.1.3.2.Les mesures expérimentales :**

Etant donné que ce mémoire porte essentiellement sur la rhéologie des suspensions colloïdales, nous allons donc nous limiter juste à la présentation du protocole de mesures concernant la rhéométrie. Nous avons appliqués ces protocoles pour les différentes températures«25, 35, 45, 55 et 65 C°».

**IV.1.3.2.1.Le régime stationnaire**

- **Les courbes d'écoulement**

Le protocole de mesure est le suivant :

- Agitation préalable de l'échantillon sous un agitateur magnétique pendant 2 minutes
- Précisaillement sous un fort cisaillement de 800 $s^{-1}$ pendant 60 secondes.
- Rampe de contrainte croissante «0.01-800 $s^{-1}$»fixant le temps de stabilisation de chaque palier à 5 s.
- Rampe de contrainte décroissante «800-0.01 $s^{-1}$»fixant le temps de stabilisation de chaque palier à 5 s.
- 30 points de mesure pour l'aller et le retour.
- 5 boucles de mesure.

**IV.1.3.2.2.Le régime dynamique**

- **Balayage en contrainte**

- Agitation préalable de l'échantillon sous un agitateur magnétique pendant 2 minutes.
- Précisaillement sous un fort cisaillement de 800 $s^{-1}$ pendant 60 secondes.
- Repos sous la géométrie pendant 40 minutes.
- Balayage en contrainte sous la fréquence de $\omega$=10 rad/s et $\tau$ = 0.01-15 Pa, 33 points de mesure pour un palier de 30 secondes.

- **Balayage en fréquence**

Le protocole adopté est le suivant :

- Agitation préalable de l'échantillon sous un agitateur magnétique pendant 2 minutes.
- Précisaillement sous un fort cisaillement «0.01-800 $s^{-1}$» pendant 60 secondes.
- Repos de 90 minutes dans la géométrie de mesure.
- Balayage en fréquence compris entre «$\omega$=100 à $10^{-2}$ rad/s» et«$\tau$ =0.1 Pa», 21 points de mesure.

- **Balayage en temps (suivi cinétique)**

Les essais de cinétique de structure ont été réalisés sur des échantillons âgés de 24 heures suivant le protocole :

- Agitation préalable de l'échantillon sous un agitateur magnétique pendant 2 minutes.
- Balayage en temps sous la fréquence de «$\omega$=10 rad/s» et «$\tau$ = 0.09Pa», 5 points de mesure pour un palier de 20 secondes.
- Cisaillement sous un fort cisaillement 3000 $s^{-1}$,10 points de mesure pour un palier de 0.1 seconde.
- Repos pendant 0.5 seconde.
- Balayage en temps sous la fréquence de «$\omega$=10 rad/s»et «$\tau$ = 0.09Pa», 5 points de mesure pour un palier de 20 secondes.

# IV.2.Résultats et discussion

## IV.2.1.Régime stationnaire

- **La bentonite**

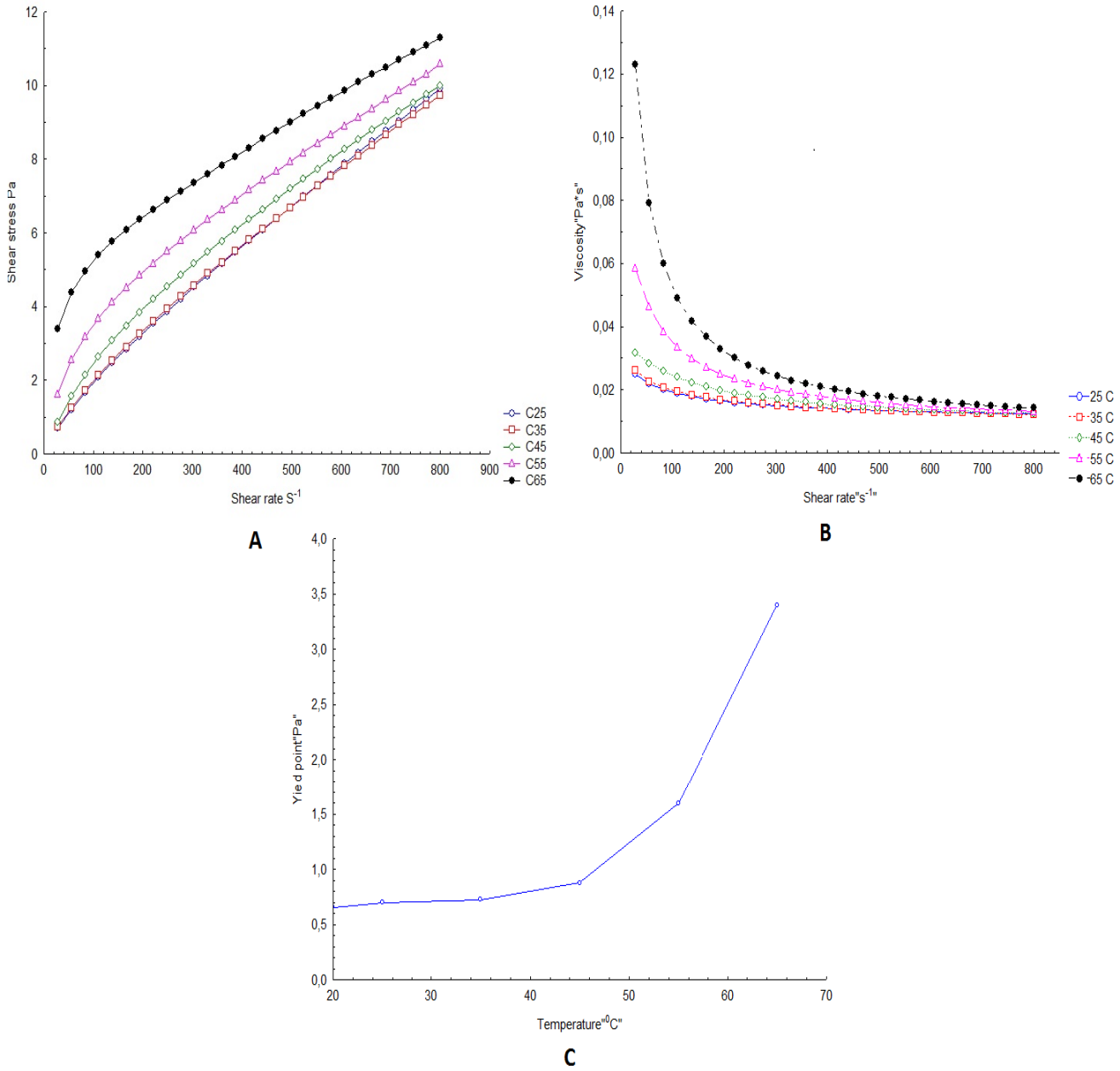


**Fig.IV.3.**Les courbes d'écoulement de la contrainte de cisaillement(A), la viscosité (B) en fonction du taux de cisaillement et la contrainte seuil (C) en fonction de la température pour la suspension de bentonite seule.

- **Le PEO**

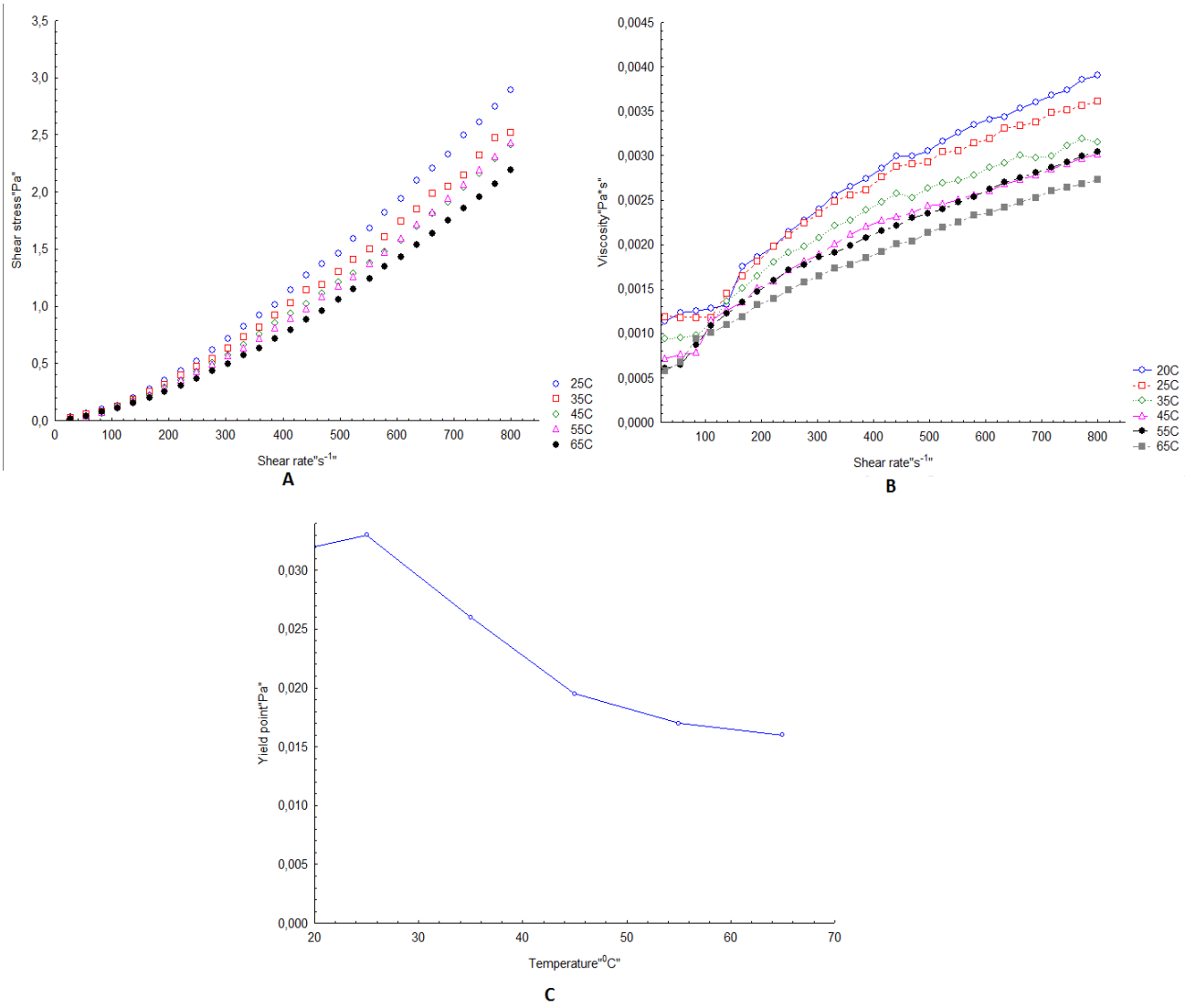


**Fig.IV.4.**Les courbes d'écoulement de la contrainte de cisaillement(A), la viscosité (B) en fonction du taux de cisaillement et la contrainte seuil (C) en fonction de la température pour la solution aqueuse de PEO.

Selon la figure«**Fig.IV.4**», nous remarquons une diminution de la viscosité du fluide, la contrainte et la contrainte seuil d'écoulement $\tau_c$ avec l'augmentation de la température.
Le comportement rhéologique de PEO est rhéoépaissaisant.

- **La bentonite + PEO**

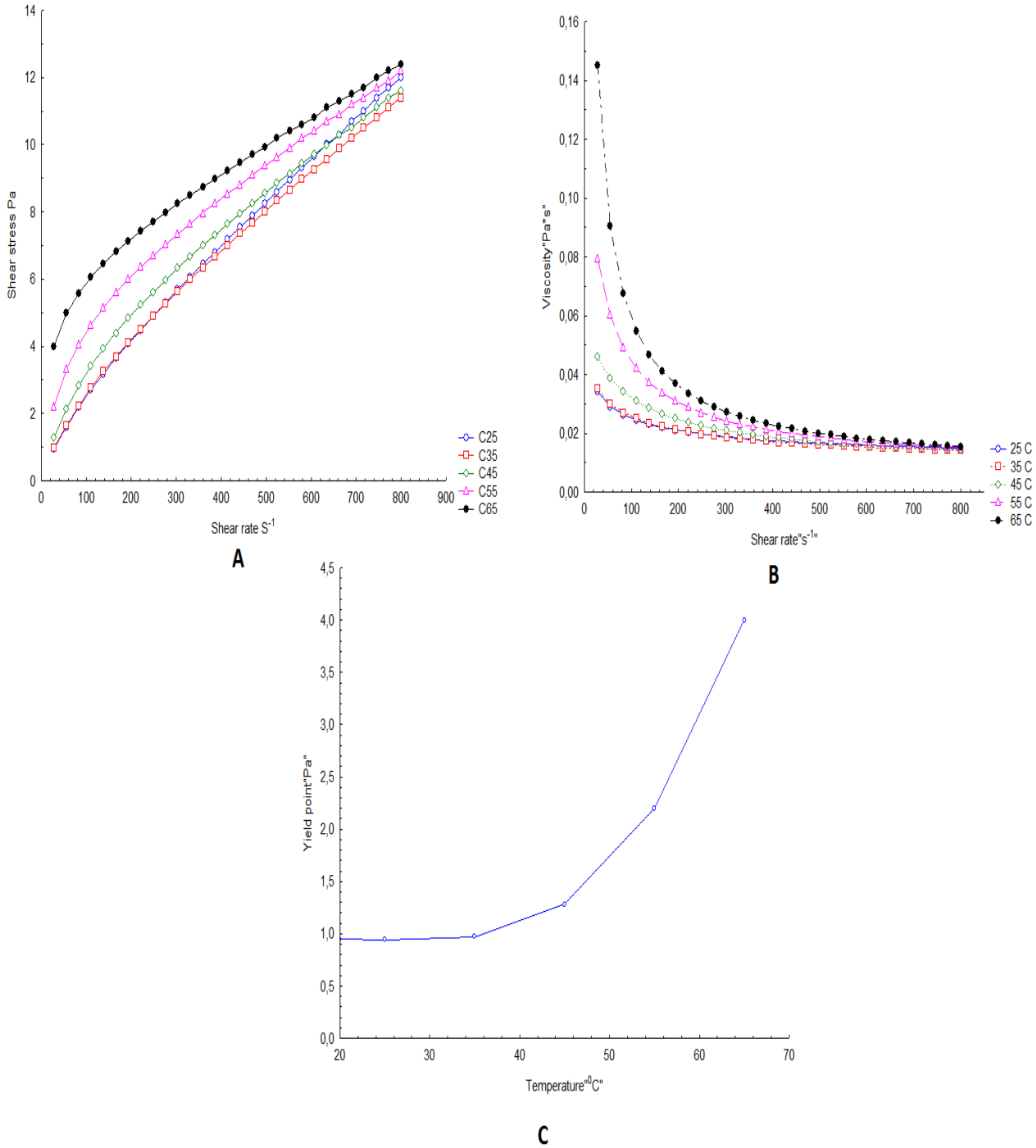


**Fig.IV.5.**Les courbes d'écoulement de la contrainte de cisaillement(A), la viscosité (B) en fonction du taux de cisaillement et la contrainte seuil (C) en fonction de la température pour le mélange«PEO+bentonite».

D'après les figures «**Fig.IV.3**» et«**Fig.IV.5**», nous remarquons une augmentation de la viscosité du fluide, la contrainte et la contrainte seuil d'écoulement $\boldsymbol{\tau_c}$($\boldsymbol{\tau_c}$ est déterminé par la projection du premier point d'inflexion de chaque courbe «$\sigma = f(\dot{\gamma})$»sur l'axe des abscisses), cette augmentation s'accentue avec l'augmentation de la température de l'essai.
Le comportement rhéologique de ces suspensions est rhéofluidifiant à contrainte seuil.

**IV.2.1.1.La modélisation**

Les comportements rhéologiques des suspensions de bentonite, solutios aqueuses de PEO et le mélange «PEO+bentonite»sont représentés par des modèles phénoménologiques à deux ou trois paramètres (Bingham, Carreau et Herschel Bulkley).

Dans cette étude, le modèle de Carreau (1968) est utilisé pour la corrélation de nos résultats expérimentaux et l'analyse des propriétés rhéologiques. L'identification des paramètres est faite par la méthode de régression non linéaire utilisant l'algorithme de Levenberg-Marcquardt (1944, 1963).Et comme notre expérience était en fonction de la température, le modèle de Carreau devient :

$$\boldsymbol{\tau = \left[\mu_\infty + (\mu_o - \mu_\infty) * [1 + (H(T) * \dot{\gamma} * \lambda)^2]^{\frac{n-1}{2}}\right] * \dot{\gamma}} \qquad \textbf{(IV.7)}$$

Avec :

$$\boldsymbol{H(T) = \exp[\alpha * \left(\frac{1}{T - T_o} - \frac{1}{T\alpha - T_o}\right)]} \qquad \textbf{(IV.8)}$$

Où :

$\lambda$ : le constant du temps (s).

$\alpha$ : l'énergie d'activation (J/kg.mol).

$T_o$: c'est une température,

par défaut$T_o$=0.

$T\alpha$ :c'est la température de référenceau-quelle $H(T)$=1.

n : l'indice de puissance.

$T\alpha$ , T sont des températures absolues.

Alors comme le $T_o = 0$ le $H(T)$ devient :

$$\boldsymbol{H(T) = \exp[\alpha * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T\alpha}\right)]} \qquad \textbf{(IV.9)}$$

Donc le modèle de Carreau devient comme suit :

$$\boldsymbol{\tau = \left[\mu_\infty + (\mu_o - \mu_\infty) * \left[1 + \left(\exp[\alpha * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T\alpha}\right)] * \dot{\gamma} * \lambda\right)^2\right]^{\frac{n-1}{2}}\right] * \dot{\gamma}} \qquad \textbf{(IV.10)}$$

Ce modèle permet de bien ajuster nos résultats expérimentaux sur une large gamme de taux de cisaillement, avec une erreur moyenne de l'ordre de 0.4%.

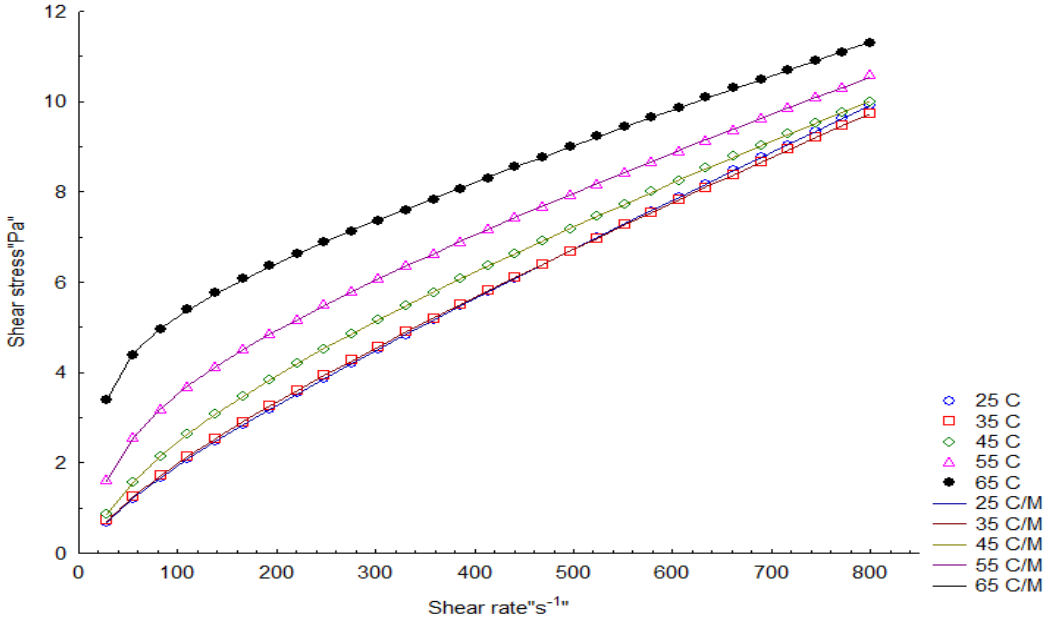


**Fig.IV.6.**Les courbes d'écoulement modélisées de la suspension debentonite.

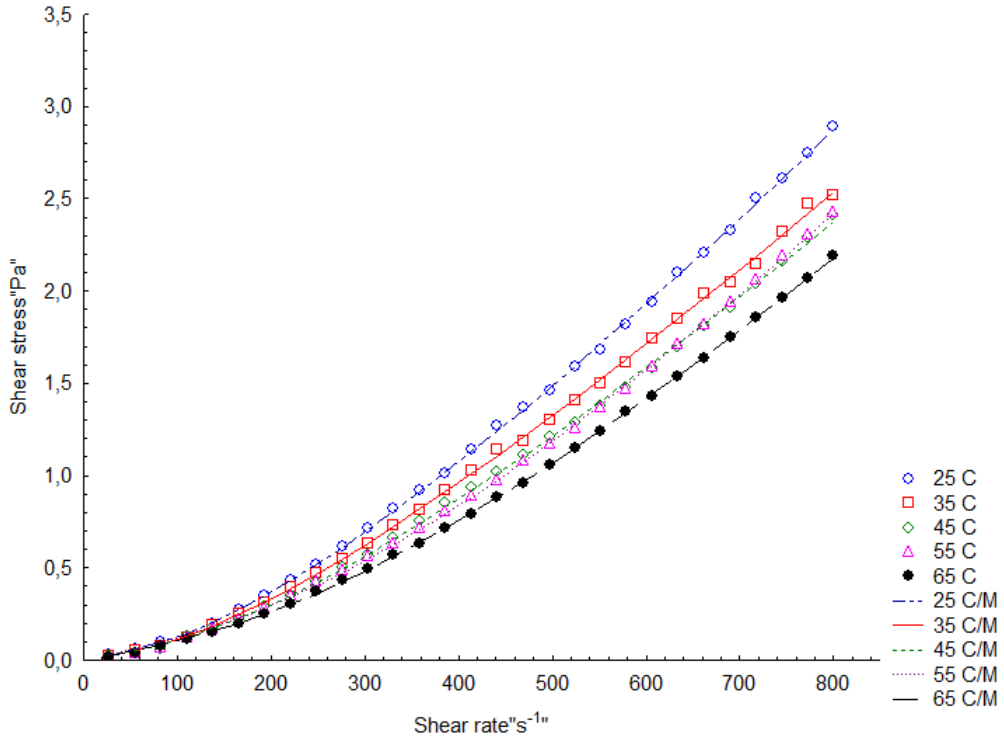


**Fig.IV.7.**Les courbes d'écoulement modélisées de solution aqueuse de PEO.

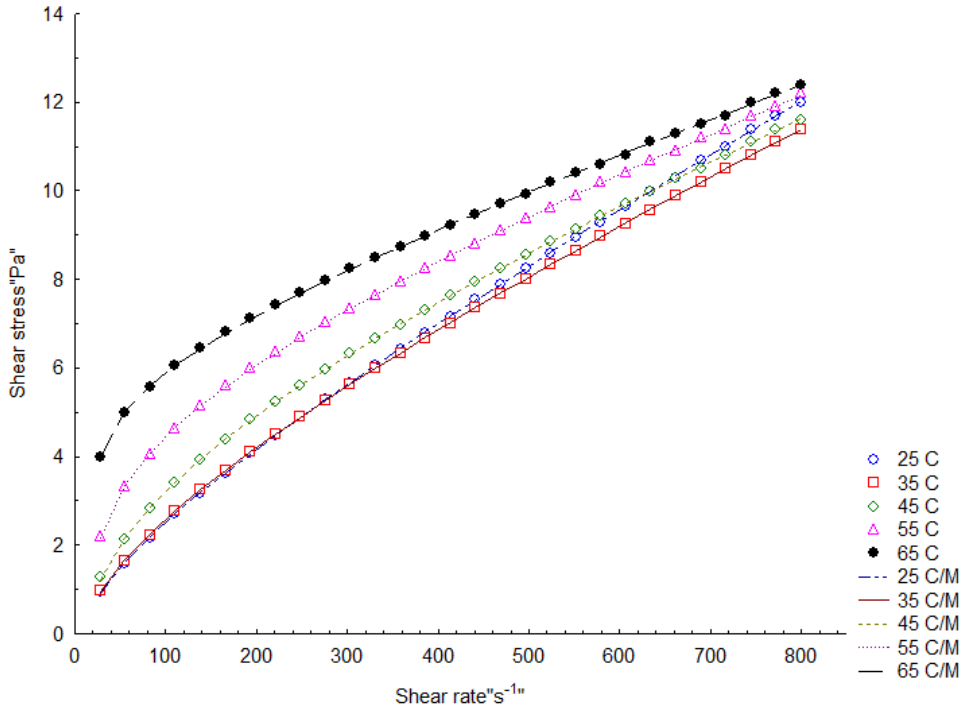


**Fig.IV.8.**Les courbes d'écoulement modélisées du mélange«PEO+bentonite».

**a) La comparaison entre les courbes d'écoulement de la bentonite et «la bentonite+PEO»**

D'après la figure «**Fig.IV.9**», on constate que le PEO a augmenté les paramétrés rhéologiques de suspensions de bentonite en fonction de la température.

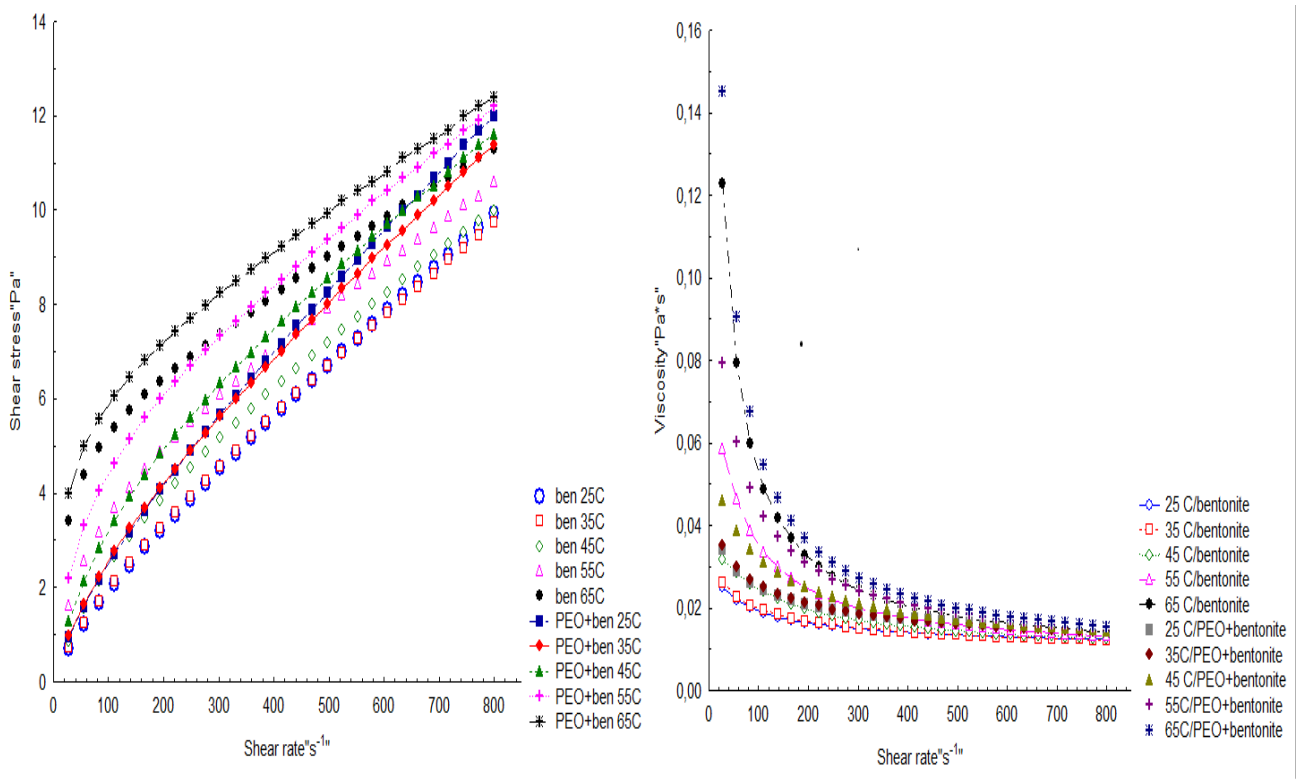


**Fig.IV.9.** La comparaison entre les courbes d'écoulement de la bentonite et la bentonite+PEO.

**b) Variation des paramètres de Carreau**

- **La bentonite**

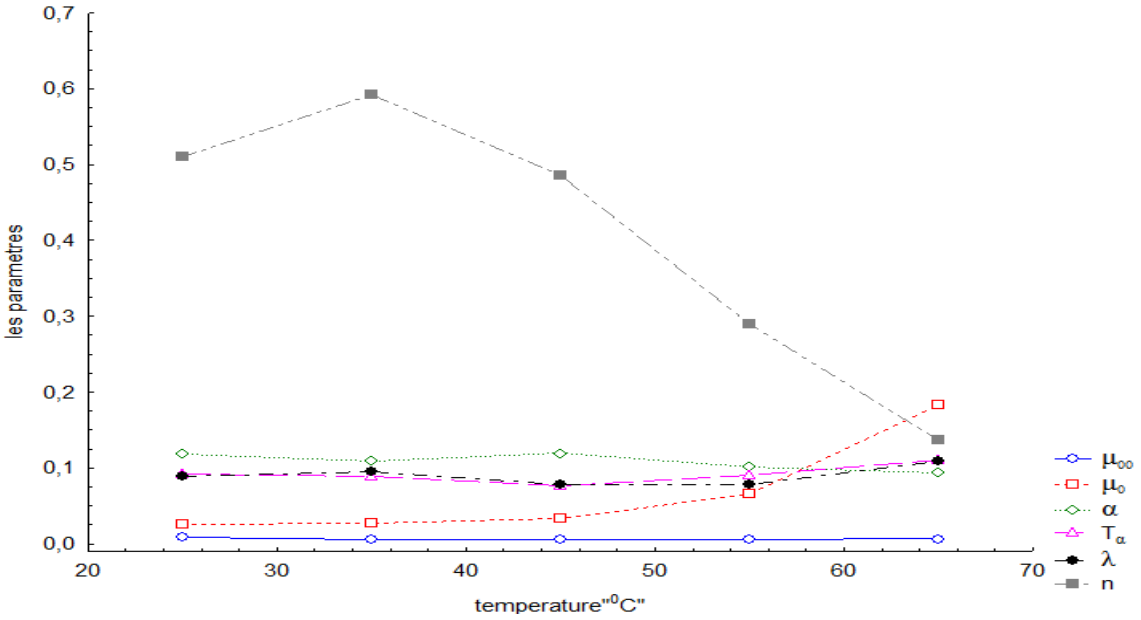


**Fig.IV.10.** La variation de paramètres de Carreau pour la suspension de la bentonite.

- **La bentonite + PEO**

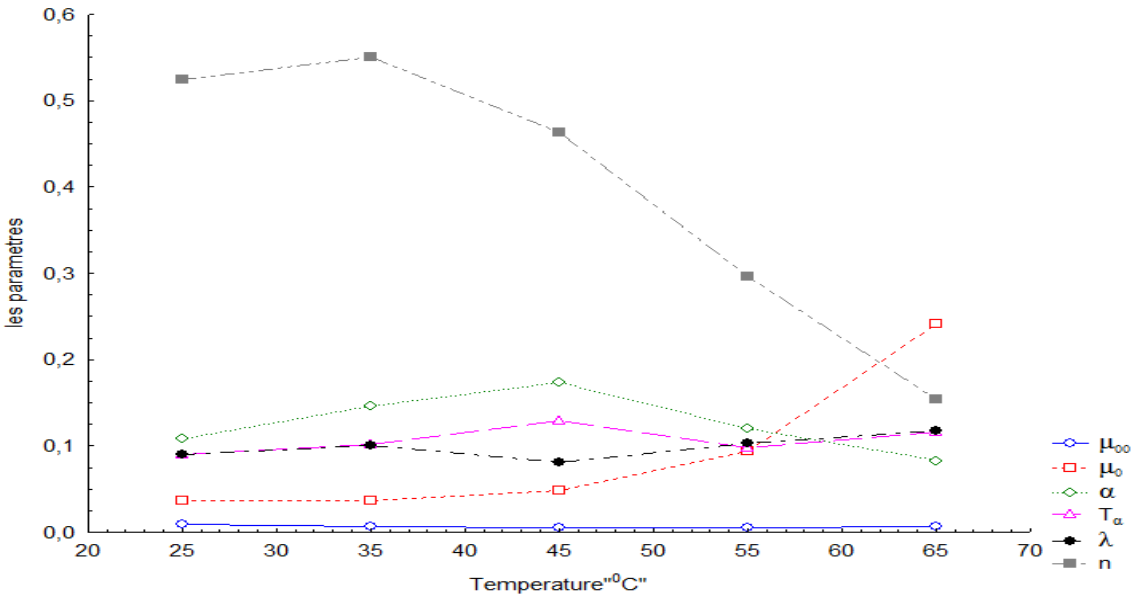


**Fig.IV.11.** La variation de paramètres de Carreau pour le mélange«la bentonite+PEO».

D'après les courbes on remarque que : $\boldsymbol{\mu_\infty}$, $\boldsymbol{\alpha, \lambda}$ et $\boldsymbol{T\alpha}$ sont presque constantes pour le système«la bentonite seule» tandis que ils sont instables pour le système «la bentonite+PEO». Par contre la viscosité $\boldsymbol{\mu_o}$augmente au fur à mesure la température augmente pour les deux systèmes et elle est plus élevée pour le mélange «bentonite+PEO».
Le n «l'indice de puissance» diminue quand la température augmente pour les deux systèmes.

### IV.2.2.Régime dynamique

### IV.2.2.1.Le balayage par contrainte

- **La bentonite**

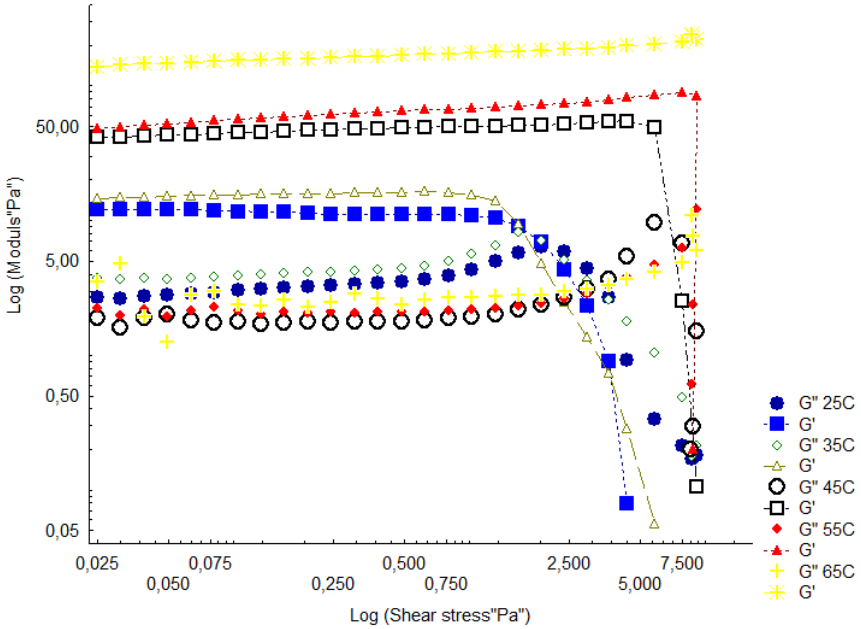


**Fig.IV.12.** Evaluation des modules G' et G'' en fonction de la contrainte de cisaillement «$\omega = 10\ rad/s$» pour le système «la bentonite seule».

- **La bentonite+ PEO**

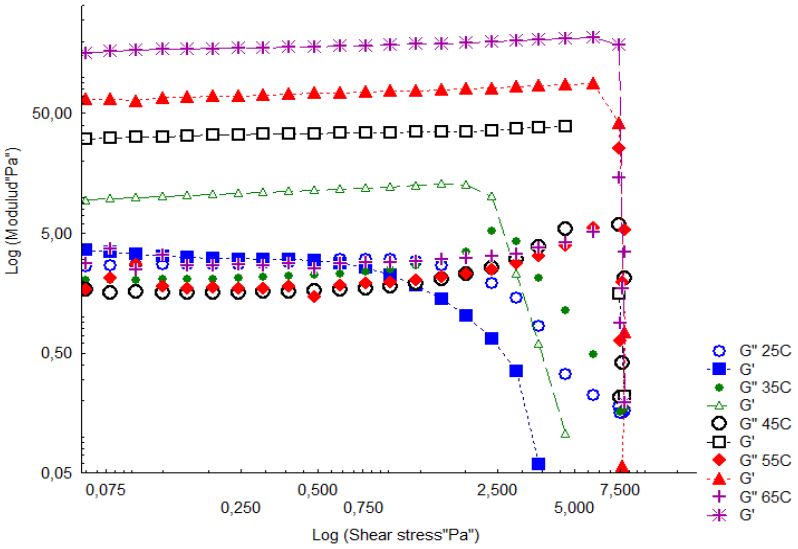


**Fig.IV.13.**Evaluation des modules G' et G'' en fonction de la contrainte de cisaillement «$\omega = 10\ rad/s$» pour le système «la bentonite+PEO».

D'après les figures «**Fig.IV.12**» et «**Fig.IV.13**», on constate :

- Pour le système « la bentonite seule » le modèle de conservation G' augmente au fur à mesure la température augmente, c'est-à-dire le système devient élastique «solide» et il perd son caractère visqueux«liquide» et afin d'obtenir ce dernier «G''», nous devons appliquer une contrainte de cisaillement considérable qui s'accentue avec l'augmentation de la température «$\boldsymbol{\tau_{25} < \tau_{35} < \tau_{45} < \tau_{55} < \tau_{65}}$».
- Tandis que, pour le système «la bentonite+PEO» la valeur de la contrainte de cisaillement nécessaire pour récupérer l'état visqueux de notre système «c'est-à-dire G''>G'» est moins par rapport à celle du système «bentonite seule».

### IV.2.2.2.Le balayage par fréquence

- **La bentonite**

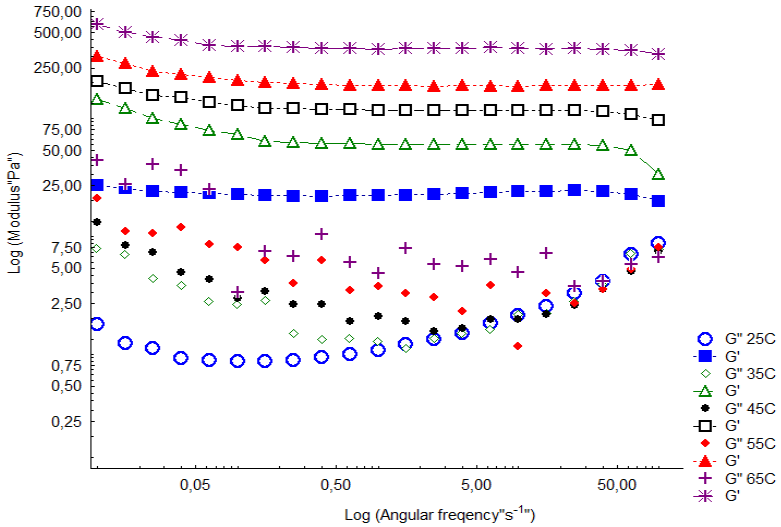


**Fig.IV.14.** Evaluation des modules G' et G'' en fonction de la fréquence angulaire «$\tau = 0.1\ Pa$» pour le système «la bentonite seule».

- **La bentonite + PEO**

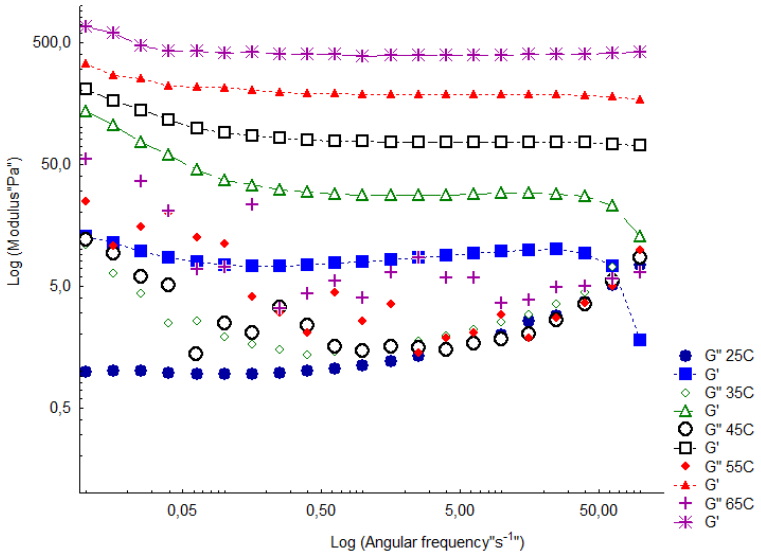


**Fig.IV.15.** Evaluation des modules G' et G''en fonction de la fréquence angulaire «$\tau = 0.1\ Pa$» pour le système «la bentonite+PEO».

Selon les figures précédentes, on observe que : l'augmentation du modèle de conservation «G'» avec l'augmentation de température pour le système «la bentonite seule», est plus élevée que celle du système «la bentonite + PEO». Donc nous assurons d'après les résultats balayage par fréquence que le PEO diminue le modèle de conservation «G'», c'est-à-dire:
$G'_{PEO+bentonite} < G'_{bentonite}$.

### IV.2.2.3.Le balayage en temps

- **La bentonite**

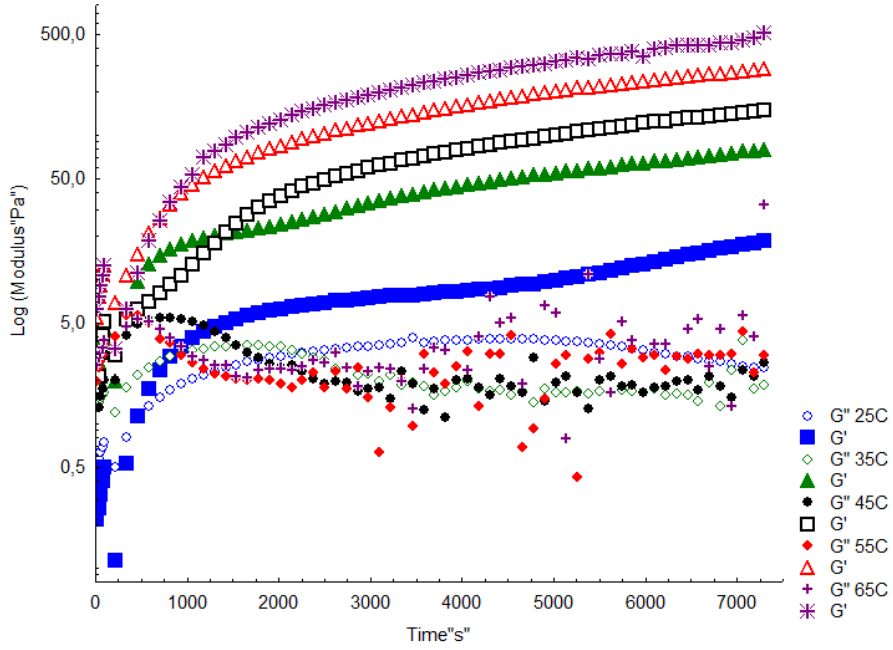


**Fig.IV.16.** Evaluation des modules G' et G'' en fonction du temps «$\tau = 0.09\ Pa;\ \omega = 10\ rad/s$» pour le système «la bentonite seule».

- **La bentonite + PEO**

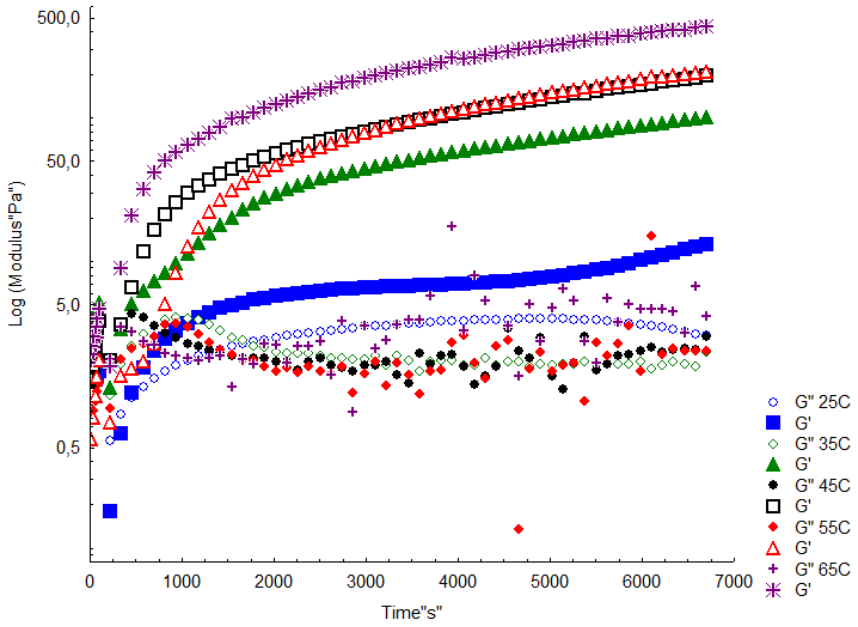


**Fig.IV.17.** Evaluation des modules G' et G'' en fonction du temps «$\tau = 0.09\ Pa;\ \omega = 10\ rad/s$» pour le système «la bentonite+PEO».

- **Le temps de gélification**

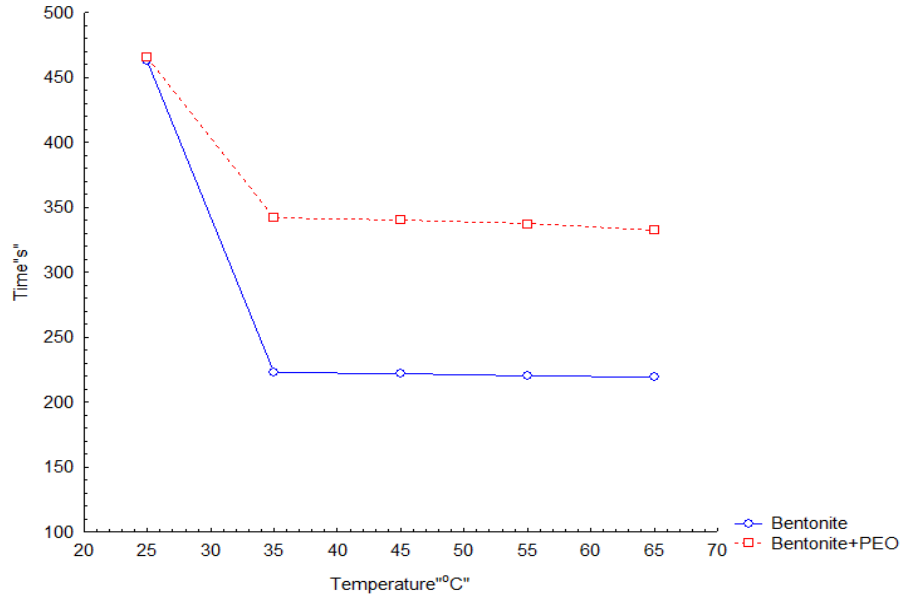


**Fig.IV.18**. La variation de temps de gélification en fonction de la température.

Nous avons déterminé le temps de gélification à partir des résultats de balayage en temps, et d'après «**Fig.IV.18**» nous remarquons que le temps de gélification diminue avec la température pour les deux systèmes, ainsi, grâce à l'effet de PEO sur la suspension de bentonite+l'eau, on constate une augmentation du temps de gélification par rapport au système «la bentonite seule-eau», alors le PEO est un fluidifiant. Le PEO ralentis la cinétique de structuration de nos suspensions de base.(Gareche et al 2012a et 2012b)

### IV.2.3.Variation de pH de suspensions

#### IV.2.3.1.Variation de pH de suspension de bentonite

L'ensemble des mesures donne un pH supérieur ou voisin de 9, cela confirme les données du fabricant (pH=9). D'autre part, nous voyons que dans tous les cas le pH diminue avec la température. Lavariation du pH des suspensions en fonction de la température est résumée dans le tableau suivant :

**Tableau.IV.3.**La varaition du pH de la bentonite en fonction de la température.

| La température | pH |
|---|---|
| 25 | 9.01 |
| 35 | 8.94 |
| 45 | 8.60 |
| 55 | 8.53 |
| 65 | 8.37 |

D'après «**Fig.IV.19»**, le pH varie quasi linéairement avec la température en suivant la loi:

**pH = 9,58 -0,0194*T**

Où : T est exprimé en dégréé Celsius.

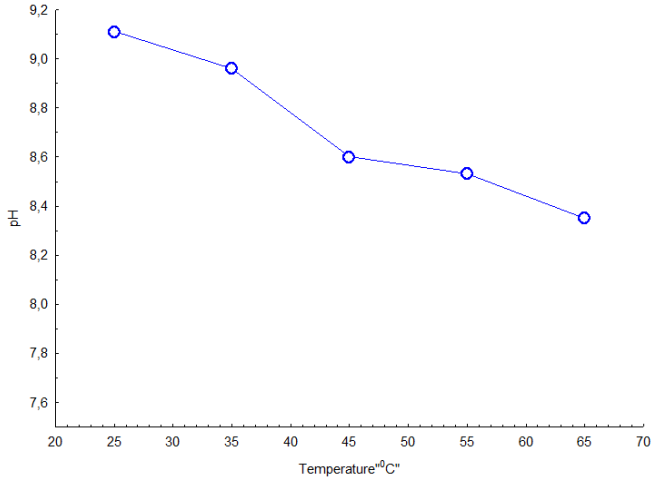


**Fig.IV.19**. La variation de pH de suspension de la bentonite seule en fonction de la température.

#### IV.2.3.2.Variation de pH du mélange «bentonite+PEO»

L'ensemble des mesures donne un pH supérieur ou voisin de 9.D'autre part, le pH diminue avec la température.

**Tableau.IV.4.**La varaition du pHde la bentonite+PEO en fonction de la température.

| La température | pH |
|---|---|
| 25 | 9,33 |
| 35 | 9,23 |
| 45 | 9,05 |
| 55 | 8,87 |
| 65 | 8,62 |

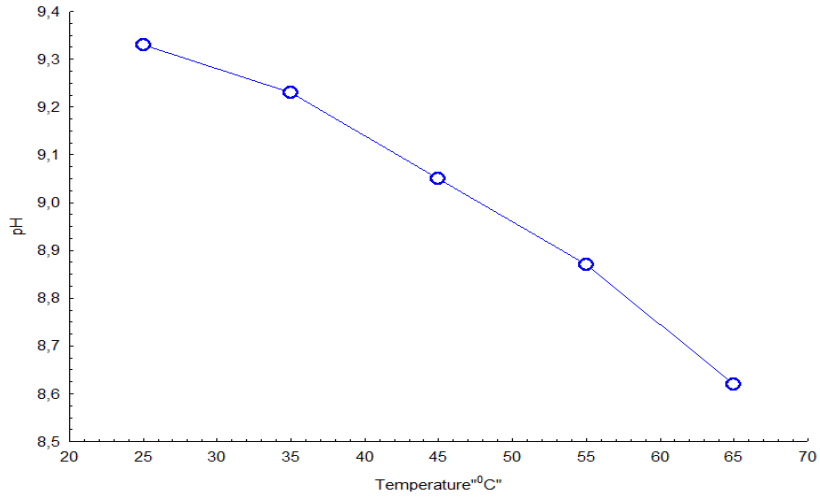


**Fig.IV.20**. La variation de pH du mélange «la bentonite+PEO »en fonction de la température.

D'après«**Fig.IV.20**», le pH varie quasi linéairement avec la température en suivant la loi :

$$pH = 9{,}82-0{,}0178*T$$

Où :Test exprimé en dégréé Celsius

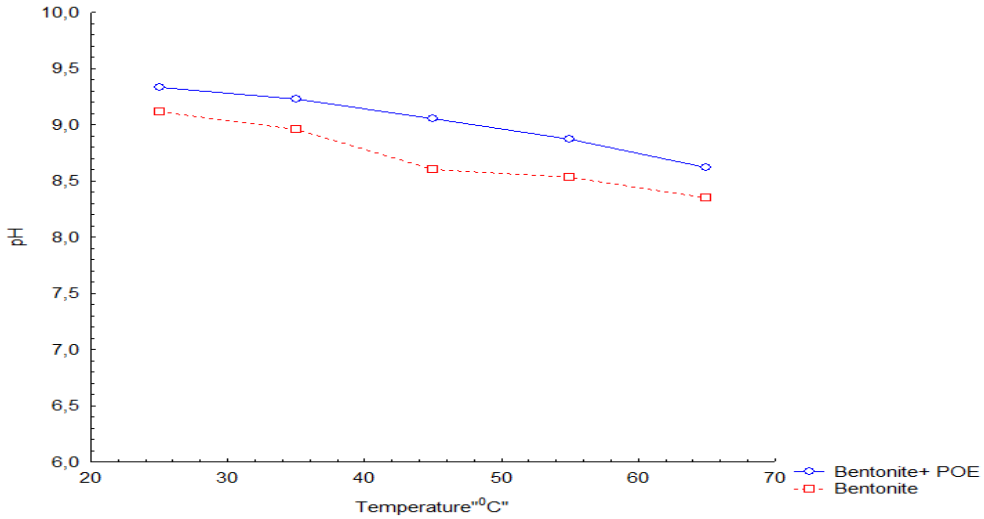


**Fig.IV.21**. La comparaison entre la variation de pH du mélange«la bentonite+PEO» et la suspension debentonite en fonction de la température.

D'après «**Fig.IV.21**», nous constatons que le pH du système « bentonite+PEO » est plus élevé que celui du système « bentonite seule ». Ainsi que, la diminution du pH du système « PEO+bentonite » est plus faible que celui du système «bentonite seule». Donc le PEO sert à augmenter le pH de notre système.

**Conclusion**

Les résultats précédents ont montré que le PEO améliore les caractéristiques rhéologiques des suspensions de base. Il diminue la gélification de nos suspensions (ralentit la cinétique de structuration). Donc il a joué le rôle d'un fluidifiant même à haute température.par contre la température accentua la cinétique de gélification par un apport d'énergie.

Pour bien comprendre le comportement de notre fluide complexe, nous avons étudié la simulation de l'écoulement d'un fluide non newtonien (PEO+bentonite) dans une conduite horizontale à l'aide d'un code de calcule.

Tout d'abord on doit faire un rappel sur les équations fondamentales d'un écoulement complexe (l'équation de conservation de masse et de la quantité de mouvement).

## V.1.Les équations d'écoulement

### V.1.1.L'équation de conservation de masse

Pour un fluide conservatif, sa masse reste constante

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \qquad \textbf{(V.1)}$$

En coordonnées cylindriques

$$\frac{1}{r}\frac{\partial (rv)}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial U}{\partial r} = 0 \qquad \textbf{(V.2)}$$

### V.1.2.L'équation de conservation de la quantité de mouvement

En coordonnées cylindriques

- Suivant r :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv^2) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}(wv) + \frac{\partial}{\partial z}(vu) - \frac{w^2}{r}\right] = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\eta}{\rho}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{\partial v}{\partial \theta}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right) - \frac{v}{r^2} - \frac{2}{r^2}\frac{\partial w}{\partial \theta}\right] \qquad \textbf{(V.3)}$$

- Suivant θ :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rvw) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}(w^2) + \frac{\partial}{\partial z}(wu) - \frac{vw}{r}\right] = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\eta}{\rho}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial w}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{\partial w}{\partial \theta}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right) - \frac{w}{r^2} - \frac{2}{r^2}\frac{\partial v}{\partial \theta}\right] \qquad \textbf{(V.4)}$$

- Suivant z:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rvu) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}(wu) + \frac{\partial}{\partial z}(u^2)\right] = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\eta}{\rho}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{\partial u}{\partial \theta}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)\right] \qquad \textbf{(V.5)}$$

Les hypothèses simplificatrices :

- L'écoulement est permanant,
- L'écoulement est unidimensionnel,
- La force de pesanteur négligeable,
- Le fluide est incompressible.

Alors l'équation de conservation de la quantité de mouvement après la simplification devient suivante $x_i (i = 1,2,3)$ :

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{dx_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \qquad \textbf{(V.6)}$$

**V.2.La géométrie**

La géométrie de notre système étudié est une conduite cylindrique horizontale de longueur L=1m et de rayon r =0.05m. Les hypothèses associées à cette simulation en utilisant le modèle de Carreau, sont :

- Le fluide est incompressible.
- Un écoulement stationnaire.
- Un régime laminaire «Re< 2100».

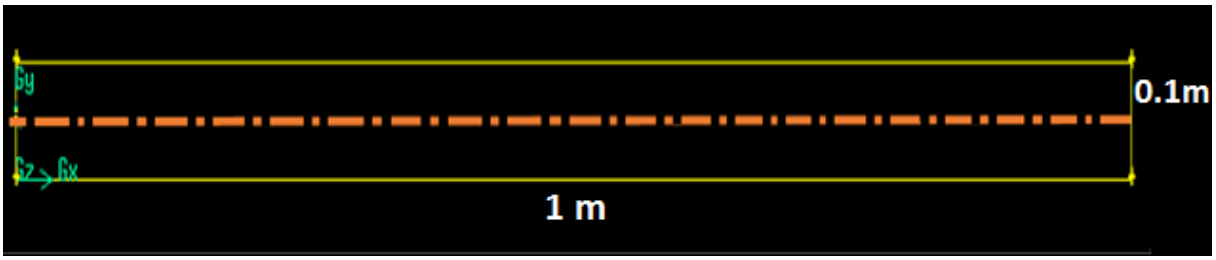


**Fig.V.1.**La géométrie de la conduite de simulation.

Afin de simuler l'écoulement de notre fluide complexe «bentonite+PEO», nous avons utilisé un code du calcul numérique.

Nous avons imposé un Reynolds variable pour notre fluide à température ambiante (25 °C) «Re = 5, 25, 125, 625».

Pour une conduite cylindrique, la formule générale de Reynolds :

$$Re=U*D*\rho/\mu \qquad \textbf{(V.7)}$$

Comme notre fluide est complexe de Carreau ; la loi de comportement qui le décrit comprend deux viscosités :

- $\boldsymbol{\mu_0}$ : est la viscosité au cisaillement nul.
- $\boldsymbol{\mu_\infty}$ : est la viscosité à cisaillement infini.

Pour calculer notre Re, nous avons choisi $\boldsymbol{\mu_\infty}$ , parce que c'est elle qui nous intéresse pour le calcul du profil de la vitesse et la pression à la sortie. Le Reynolds est défini par :

$$\boldsymbol{Re = U*D*\rho/\mu_\infty} \qquad \textbf{(V.8)}$$

### V.3.Test de maillage

Pour obtenir des résultats de simulation plus fiables, nous avons maillé notre conduite comme il est illustré dans la figure suivante :

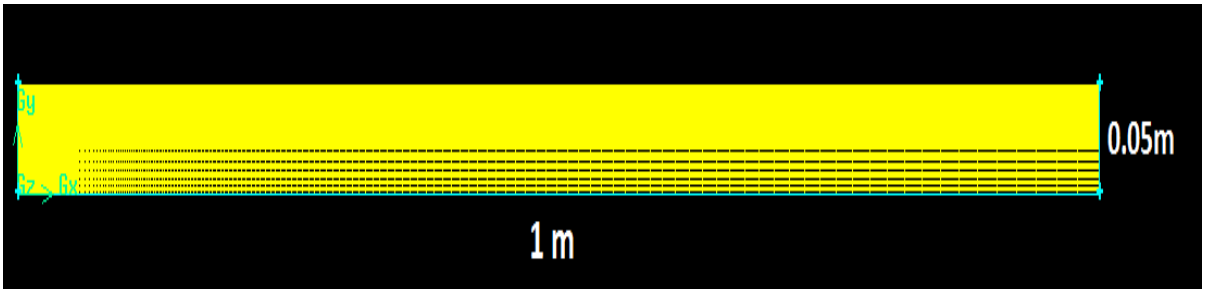


**Fig.V.2.** la conduite de simulation maillée.

Après, nous avons fait le test de maillage (test de convergence de la solution indépendamment du maillage ) avec un fluide newtonien simple en calculant la contrainte à la paroi $\boldsymbol{\tau}$ et la vitesse $\boldsymbol{u}$ pour calculer $\boldsymbol{\lambda_{ca}}$, comme suit :

$$\boldsymbol{C_f = \frac{2\tau}{\rho v^2}} \qquad \textbf{(V.9)}$$

$$\boldsymbol{\lambda_{ca} = 4 * C_f} \qquad \textbf{(V.10)}$$

On a comparé $\boldsymbol{\lambda_{ca}}$avec $\boldsymbol{\lambda_{th}}$ «$\boldsymbol{\lambda_{th}}$=64/Re», où : «$\boldsymbol{\lambda_{ca}}$ est λcalculé,$\boldsymbol{\lambda_{th}}$est λthéorique», les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau V.1.** Test de maillage pour Re=5

| **conduite** | **λ** | **λ calculé** | **L'erreur %** |
|---|---|---|---|
| 200-20sans raffinage | 12.8 | 12.7632 | 0.2875 |
| 200-20 raffinée « 1.02 x-0.98y » | 12.8 | 12.773169 | 0.2096 |
| 200-20 « 1.03x-0.99y » | 12.8 | 12.795699 | 0.0336 |
| 300-50 sans raffinage | 12.8 | 12.79607 | 0.0307 |
| 300-50 « 1.02x-0.98y » | 12.8 | 12.79618 | 0.0298 |

D'après les résultats obtenus, on a choisi le maillage 300-50 « 1.02x-0.98y », car il représente l'erreur la plus petite.

### V.4. Résultats

Nous allons représenter les résultats concernant les profils de vitesse axiale, de pression, la variation de la contrainte à la paroi, de la vitesse moyenne et de perte de charge obtenus à partir de notre simulation.

#### V.4.1.Profil de vitesse axiale

La figure (V.3) représente les profils de vitesse axiale obtenue par simulation pour différents nombres de Reynolds pour une température de 25C° :

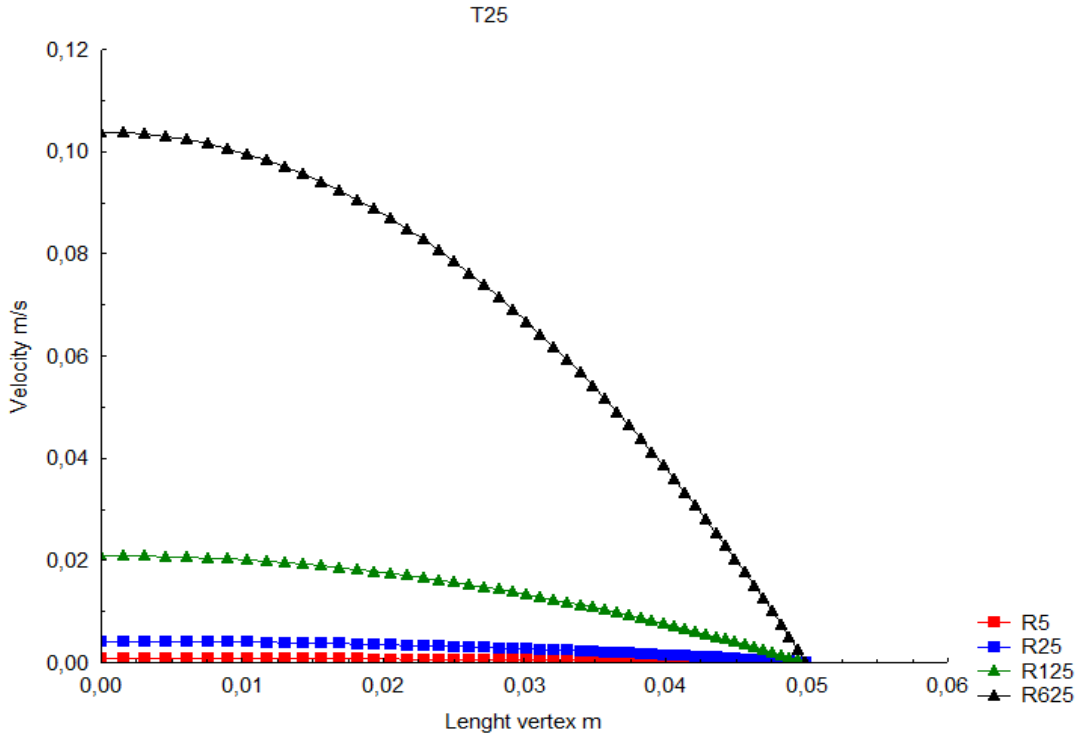


**Fig.V.3.** Les profils de vitesse axiale en fonction du Reynolds à température 25°C.

Les profils de vitesse obtenue sont des profils newtoniens (paraboliques) plus aplatis en diminuant le nombre de Reynolds.

### V.4.2.La pression

Nous avons :

$$\boldsymbol{Q = A * v^2} \qquad \textbf{(V.11)}$$

$$\boldsymbol{P = \frac{F}{A}} \qquad \textbf{(V.12)}$$

Alors :

$$\mathbf{P} = \boldsymbol{F * \frac{v^2}{Q}} \qquad \textbf{(V.13)}$$

**Q** est le débit.

La figure (V.4) montre l'évolution de la pression pour différentes valeurs du Reynolds

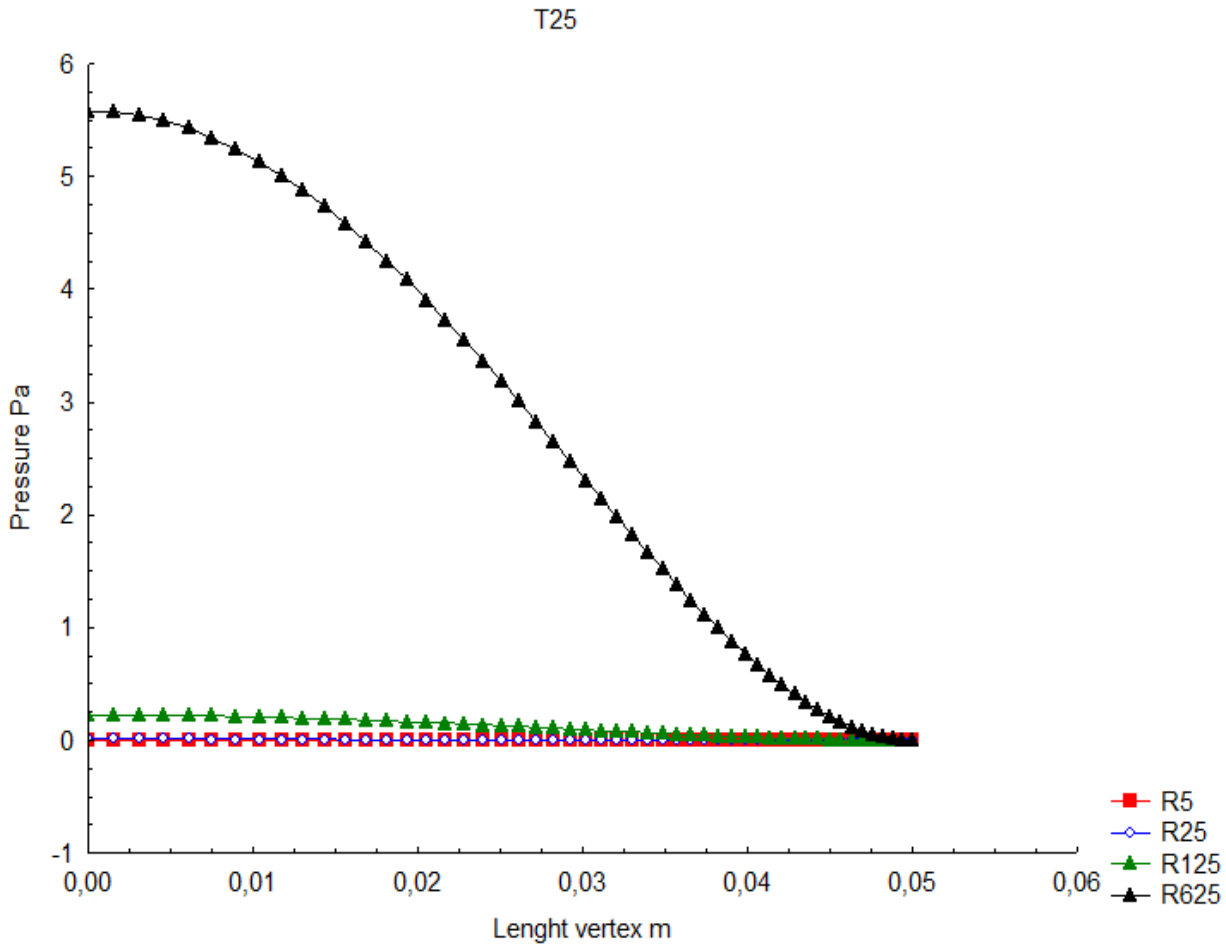


**Fig.V.4.** Les profils de pression en fonction du Reynolds à température 25°C.

La résistance à l'écoulement qui est dû à la viscosité du fluide provoque des chute de pressions. Ces chutes sont d'autant plus importantes que le Reynolds est grand.

### V.4.3.La contrainte à la paroi

La figure (V.5) représente la variation de la contrainte à la paroi en fonction du Reynolds

D'après les résultats obtenus, on constate que La contraint à la paroi augmente avec l'augmentation du Reynolds.

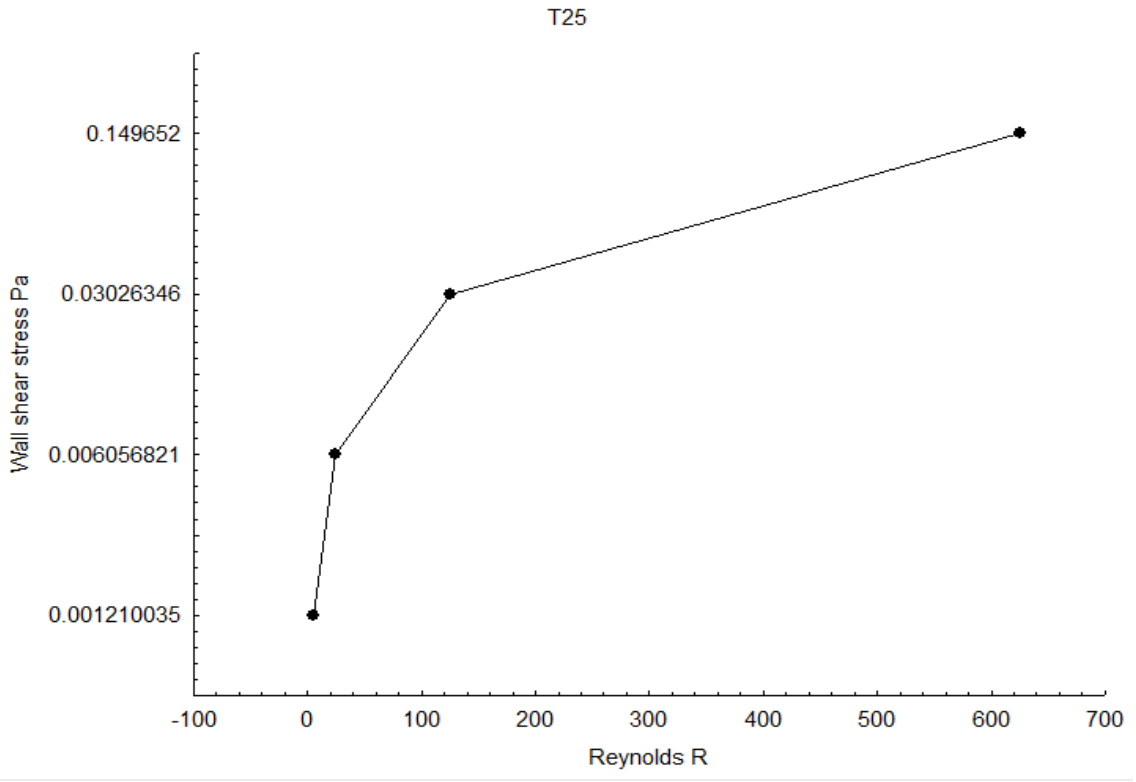


**Fig.V.5.** Variation de la contrainte à la paroi en fonction du Reynolds à température 25ºC.

### V.4.4.La vitesse moyenne

La variation de la vitesse moyenne à la sortie de la conduite est représentée sur la figure suivante

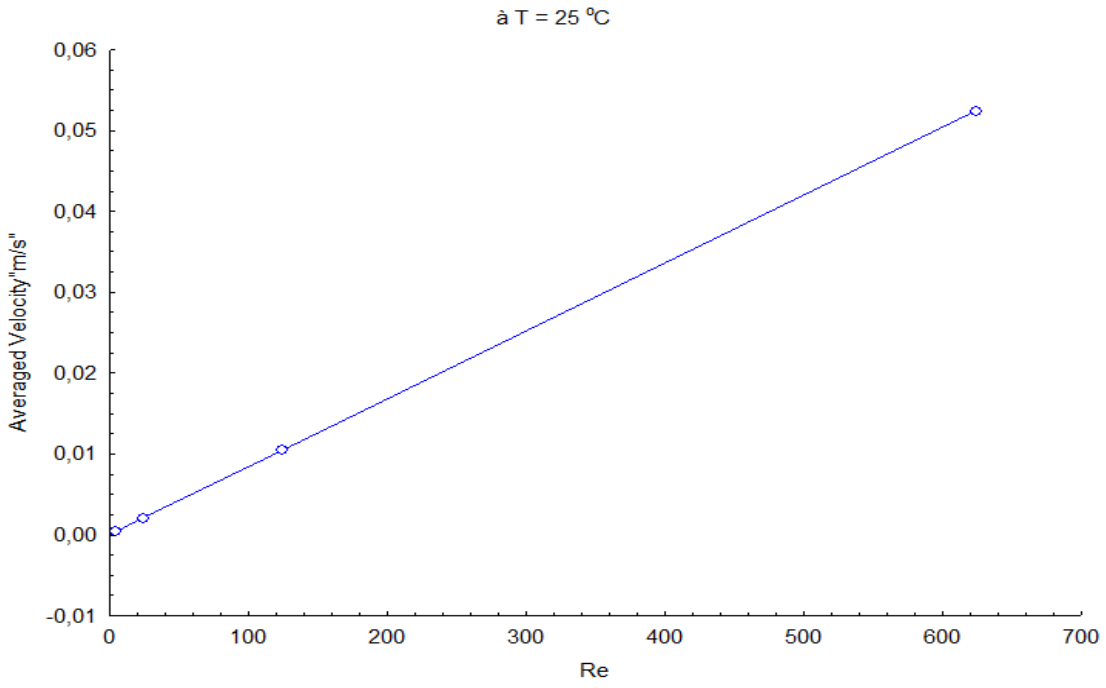


**Fig.V.6.** Variation de la vitesse moyenne en fonction du Reynolds à température 25 ºC.

Nous constatons une augmentation de la vitesse moyenne avec l'augmentation du Reynolds puisque la vitesse moyenne est une grandeur liée directement au nombre de Reynolds.

### V.4.5.Perte de charge

La figure suivante représente la variation de perte de charge en fonction du Reynolds

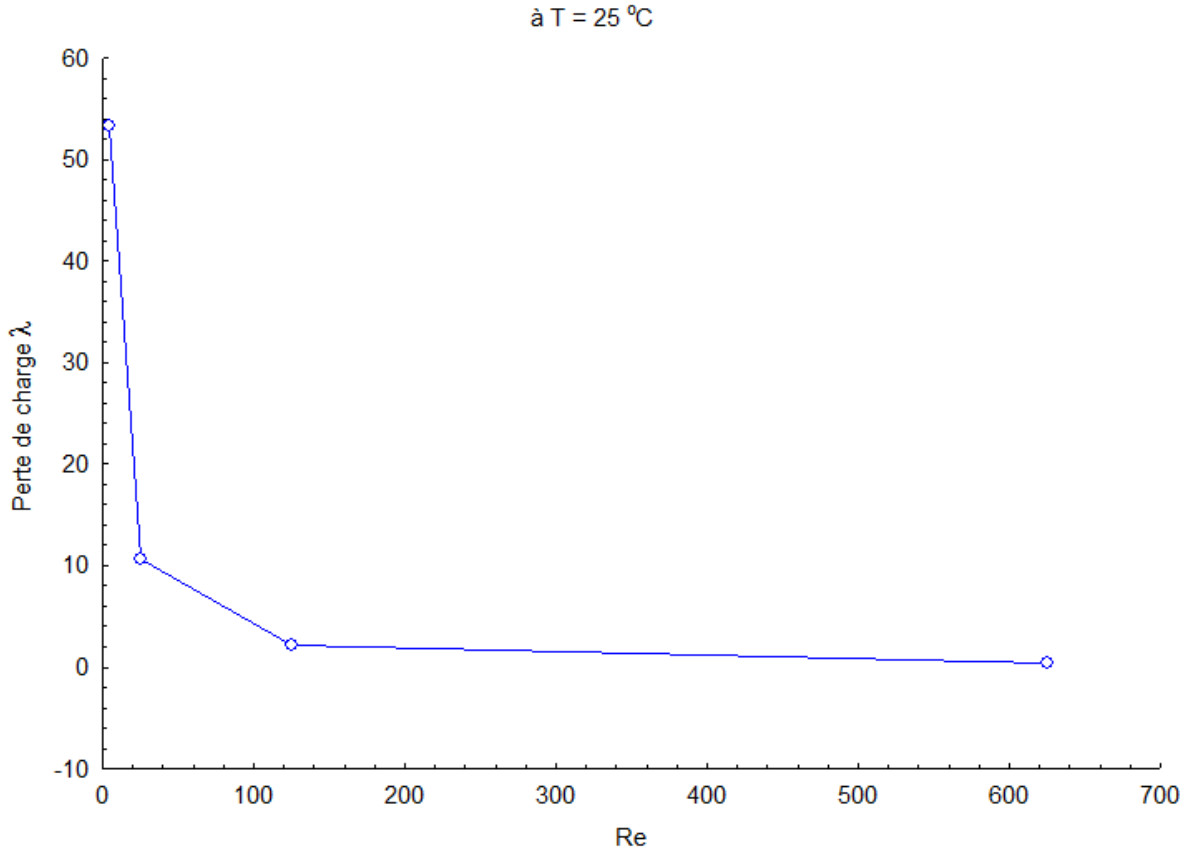


**Fig.V.7.** Variation de λ en fonction du Reynolds à température 25 °C.

Nous observons une diminution de λ avec l'augmentation du Reynolds et ceci est logique puisque on a des chutes de pressions en augmentant le Reynolds.

### Conclusion

D'après les résultats obtenus à partir de la simulation on a une très bonne concordance entre les différents paramètres étudiés ; une chute de pression et une diminution des pertes de charge en fonction du Reynolds. Une augmentation de la vitesse moyenne et de la contrainte à la paroi en fonction du Reynolds.

# Conclusion générale

Le but de cette étude était la caractérisation rhéologique d'une suspension de bentonite en présence du polymère polyéthylène oxyde (PEO 10000), en fonction de la température dans l'objectif d'étudier le phénomène de floculation des boues bentonitiques à haute température.

Il est tout d'abord ressorti que le PEO a une grande influence sur les propriétés rhéologiques des suspensions de bentonite de base. En premier lieu, le système (bentonite 6% + PEO 0.5%) a été caractérisé rhéologiquement par le régime stationnaire, il a été montré que le mélange (bentonite-PEO) a un comportement thixotrope à contrainte seuil. Mais en comparaison avec un système (bentonite 6%) il est constaté une amélioration des paramètres rhéologiques du système : augmentation de la viscosité (contraintes de cisaillement) avec l'augmentation de température.

Les résultats des tests oscillatoires ont montré que le PEO diminue le module de conservation (ou module d'élasticité), il est conclue que l'ajout de PEO a tendance à diminuer la cinétique de l'agrégation des particules d'argile, augmentant ainsi le temps de gélification.

D'après les résultats obtenus, il en est ressorti les conclusions suivantes :

- La température a un effet sur la re-dispersion des particules dans la suspension ce qui fait augmenter ainsi les paramètres rhéologiques (viscosité et contrainte seuil).
- L'ajout du PEO permet de minimiser la tendance de floculation et ainsi se présente comme une solution intéressante au problème traité.

Pour les résultats de la simulation, tous les profils de vitesse obtenus pour les différents Reynolds étudiés sont des profils newtoniens (plus aplatis que le Reynolds augmente), on a constaté des chutes de pressions (et de pertes de charge) en augmentant le Reynolds qui sont dues au caractère visqueux de nos suspension.

Ce travail pourrait également être approfondi et complété par :

- L'ajoute de concentration différentes de PEO et voir l'effet de la température sur les paramètres rhéologiques.
- Une étude de la microstructure en utilisant DRX, MEB…etc.
- Etude de la stabilité de nos suspensions en fonction de la température à l'aide de mesure de Zétamétrie.
- Quant à la simulation de l'écoulement du fluide, il sera intéressant de faire une étude de l'écoulement avec transfert de chaleur dans une conduite qui présente une singularité (rétrécissement brusque ou élargissement brusque).

# *Nomenclature*

MWD: Measurement While Drilling.

FCL: lignosulfonate de fer et de chrome «ferrochrome».

LC : lignites chromées.

API: American Petroleum Institut.

pb : l'alcalinité de la boue.

pf et Mf : l'alcalinité du filtrat.

Å : Angstrom, 1 Å = $10^{-10}$ m.

CEC : capacité d'échange cationique «méq/100g».

F: Force (N).

A: Surface ($m^2$).

μ: La viscosité.

η: La viscosité absolue.

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement ($s^{-1}$).

γ: La déformation.

τ ou σ: La contrainte de cisaillement (Pa).

$\tau_0$ ou $\sigma_s$: La contrainte seuil.

$\mu_0$: La viscosité au cisaillement zéro (Pa.s).

$\mu_\infty$: La viscosité à l'infini de cisaillement.

$\mu_p$: La viscosité plastique.

$\mu_a$: La viscosité apparente.

ν: La viscosité cinématique ($m^2/s$).

Vavg : La vitesse moyenne.

k: Le coefficient de la consistance.

n: L'indice de puissance.

m: La constante de taux de Cross.

C: La constante du temps de Cross.

ρ: La masse volumique du fluide ($kg/m^3$).

T : La température (°C).

P : La pression (Pa).

R: Le nombre de Reynolds.

V : La vitesse d'écoulement (m/s).

$V_{limite}$ : La vitesse limite d'écoulement.

$\overline{V}$: La vitesse moyenne d'écoulement.

l : La longueur caractéristique de rhéomètre (m).

$G^*$: Le modèle de cisaillement complexe.

$G'$: Le module de conservation (Pa).

$G''$: Le module de perte (Pa).

ω : La fréquence (rad/s).

$T_m$: Le point de fusion (°C).

$\eta^*$ : La viscosité complexe.

δ : L'angle de perte.

λ : Constant du temps (s).

Q: Débit ($m^3/s$).

# *Références bibliographiques*


- An introduction to Rheology: Barnes, Howard A, Walters, Kenneth, Hutton, John Fletcher 1989. P: 1-40.
- Introduction à l'étude rhéologie: Persoz, Bernard 1960. P : 12-27.
- Introduction to polymer rheology: Shaw, Montgomery T 2012. P : 10-30.
- Caillère, S. Hénin and M. Rautureau, "Minéralogie des argiles" Masson, Tomes 1 et 2, 1982. P : 184 et 189.
- Luckham et Rossi: «Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions». «Adv. colloid Interface Sci», 1999. P: 82, 43-92.
- Jozja "Étude de matériaux argileux Albanais. Caractérisation "multi-échelle" d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité". Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, 2003.
- M'bodj, O., N. K. Ariguib, M. T. Ayadi and A. Magnin, Plastic and elastic properties of the systems interstratified clay-water electrolyte-xanthan. J. Colloid Interface Sci. 2004. P : 273, 675-684.
- Pons (1980), Pons, C. H., Mise en évidence des relations entre la texture et la structure dans les systèmes eausmectites par diffusion aux petits angles du rayonnement synchrotron, "Thèse de doctorat de L'Université d'Orléans, 1980".
- Suetsugu, Y. et White J.L. A Theory of Thixotropic Plastic Viscoelastic Fluids with a Time-Dependent Yield Surface and its Cornparison to Transient and Steady State Experiments on Small Particle Filled Polyrner Melts. J. Non-Newt. Fluid Mech, 1984. P: 14, 121-140.
- Viallis-Terrisse, H., Interaction des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles. Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne, 2000.
- Touret, O., C. H. Pons, D. Tessier and Y. Tardy, "Etude de la repartition de l'eau dans des argiles saturées $Mg^{2+}$ aux fortes teneurs en eau" Clay Minerals, 1990. P : 25, 217-233.
- Thermodynamics and rheology Verh's, J 1997.