

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**Ecole Nationale Polytechnique**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

LAVALEF

**Département Génie Chimique**

Laboratoire de valorisation des énergies fossiles

Mémoire de Master en Génie Chimique

**Etude rhéologique d'une  
suspension d'oxyde de zinc**

**Meriem Imane SAHLI**

Sous la direction de Mr. Toudert AHMED ZAÏD Professeur ENP

Présentée et soutenue publiquement le (14/06/2017)

**Composition du Jury :**

**Présidente : Mme. Saliha HADDOUM, MCB, ENP**

**Rapporteur/ Promoteur : Mr. Toudert, AHMED ZAÏD, Professeur ENP**

**Examinatrices : Mme Y. TCHOULAK, MAA, (ENP)**

**Mme. Farida MEZIANI, MAA, (ENP)**

**ENP 2017**



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



LA VALEF

**Département Génie Chimique**

Laboratoire de valorisation des énergies fossiles

Mémoire de Master en Génie Chimique

**Etude rhéologique d'une  
suspension d'oxyde de zinc**

**Meriem Imane SAHLI**

Sous la direction de Mr. Toudert AHMED ZAÏD Professeur ENP

Présentée et soutenue publiquement le (14/06/2017)

**Composition du Jury :**

**Présidente : Mme. Saliha HADDOUM, MCB, ENP**

**Rapporteur/ Promoteur : Mr. Toudert, AHMED ZAÏD, Professeur ENP**

**Examinatrices : Mme Y. TCHOULAK, MAA, (ENP)**

**Mme. Farida MEZIANI, MAA, (ENP)**

**ENP 2017**

## *Dédicace*

*Au meilleur des pères*

*A ma très chère maman*

*Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté*

*A qui je dois tout*

*A ma sœur Amira à qui je souhaite plein de réussite*

*A mes très chers frères Billel et Djamel que dieu vous  
garde pour moi*

*A ma mama Fouzia pour son encouragement et son  
soutien*

*A ma mima que dieu lui garde sa santé*

*A mon grand-père dieu lui rend la santé*

*A tous mes tantes et oncles*

*A mes chers cousins*

*A tous mes amis*

*A tous ceux qui me sont chers*

## *Remerciements*

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail, à leur tête M le professeur T. AHMED ZAÏD pour m'avoir guidé et orienté dans cette étude avec compétence et bienveillance, qu'il veuille trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'exprime mon profond respect aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font de bien vouloir juger mon travail.

Madame S. HADDOUM, MCB, (ENP) : Présidente de jury

Madame Y. TCHOULAK, MAA, (ENP): Examinatrice

Madame. Farida MEZIANI, MAA, (ENP): Examinatrice.

## المخلص

نفتتح في هذه الأطروحة تركيب تعليق لأكسيد الزنك في محلول مائي لكربوكسيميثيل سيليلوز الصوديوم و دراسة سلوكه الريولوجي و تبين ما مدى تأثير السلوك الريولوجي للكربوكسيميثيل سيليلوز الصوديوم على السلوك العام للتعليق

## الكلمات الدالة

ريولوجيا, تعليق, أكسيد الزنك, اللزوجة

## ABSTRACT:

In this study, we propose to study the rheological behavior of a 3% zinc oxide suspension in a sodium carboxymethyl solution. This study allowed us to identify the effect of CMC (Na) on the behavior of the suspension.

## Key Words:

Rheology, Zinc oxide, Sodium Carboxymethylcellulose, Viscosity.

## Résumé :

Dans cette étude nous nous proposons d'étudier le comportement rhéologique d'une suspension d'oxyde de zinc de 3% dans une solution de carboxyméthyle de sodium. Cette étude nous a permis d'identifier l'effet de la CMC(Na) sur le comportement de la suspension.

## Mots clés :

Rhéologie, oxyde de zinc, Carboxyméthylcellulose de sodium, viscosité.

## Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

<b>Introduction</b> .....	<b>8</b>
<b>Partie Bibliographique</b>	
<b>I Chapitre 1 : Généralités sur la rhéologie</b> .....	<b>11</b>
I.1 Définition de la rhéologie.....	11
I.2 Mouvement laminaire de cisaillement .....	11
I.3 Grandeurs fondamentales de la rhéologie.....	11
I.3.1 Contrainte de cisaillement .....	11
I.3.2 Déformation.....	12
I.3.3 Vitesse de cisaillement.....	13
I.4 Equation rhéologique d'état et rhéogrammes .....	13
I.4.1 Equation rhéologique d'état.....	13
I.4.2 Rhéogrammes.....	13
I.5 La viscosité .....	14
I.5.1 Viscosité dynamique (apparente) .....	14
I.5.2 Viscosité cinématique.....	14
I.5.3 Viscosité relative, spécifique, intrinsèque .....	14
<b>II Chapitre 2 : Typologie des écoulements</b> .....	<b>17</b>
II.1 Le comportement newtonien.....	17
II.2 Le comportement non-newtonien.....	17
II.2.1 Comportement non-newtonien indépendant du temps .....	17
II.2.2 Comportement non-newtonien dépendent du temps .....	22
<b>III Chapitre 3 : Rhéométrie et dispositifs expérimentaux</b> .....	<b>26</b>
Introduction .....	26
III.1 Principe de fonctionnement.....	26
III.2 Variables liées au viscosimètre .....	26
III.3 Mesures de la viscosité du fluide .....	27
III.4 Mesures du taux de cisaillement.....	27
<b>IV Chapitre 4 : Etude bibliographique d'une suspension de ZnO</b> .....	<b>29</b>

IV.1 Oxyde de Zinc.....	29
IV.1.1 Définition .....	29
IV.1.2 Structure.....	29
IV.1.3 Propriétés typique du ZnO.....	30
IV.1.4 Utilisations.....	30
IV.2 Carboxymethylcellulose de sodium .....	30
IV.2.1 Définition .....	30
IV.2.2 Rhéologie des solutions de CMC(Na).....	32

### **Partie Expérimentale**

Introduction .....	34
I Mode opératoire.....	34
I.1 Préparation de la suspension.....	34
I.2 Mesure de la viscosité.....	34
II Résultats obtenus .....	35
III Modélisation du comportement .....	36
<b>Conclusion .....</b>	<b>38</b>
<b>Références.....</b>	<b>39</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>41</b>



### *Liste des tableaux*

Tableau 1: Propriétés de l'oxyde de zinc [19].....	30
Tableau 2: Résultats de l'analyse rhéologique .....	35

### *Liste des figures*

Figure 1: Forces agissant sur deux éléments de couches voisines [3] .....	11
Figure 2: Représentation schématique du cisaillement d'un fluide entre deux plans parallèles en mouvement rotatif [3].....	12
Figure 3: Schéma représentatif de l'angle entre la tangente et le vecteur de déplacement [3] .....	13
Figure 4: Rhéogramme d'un fluide newtonien [7].....	17
Figure 5: Rhéogramme d'un liquide rhéofluidifiant [7].....	18
Figure 6: Rhéogramme d'un liquide rhéoépaississant [7].....	19
Figure 7: Rhéogramme d'un liquide de Bingham [7] .....	21
Figure 8: Rhéogramme d'un liquide de Casson [7].....	22
Figure 9: Boucle d'hystérésis de référence de gel fluidifiant [7] .....	23
Figure 10: Caractéristiques géométriques de deux cylindres coaxiaux [14] .....	27
Figure 11: Représentation des structures cristallines du ZnO : (a) Rocksalt cubique, (b) zinc blende, (c) hexagonale Wurtzite. Atome de zinc en gris et oxygène en noir. [18] .....	29
Figure 12: Fonctions et propriétés de la CMC (Na).....	31
Figure 13: Structure de la carboxyméthylcellulose de sodium [21] .....	31
Figure 14: Courbe de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement .....	35
Figure 15: Rhéogramme de la suspension ZnO.....	36
Figure 16: Représentation log-log du rhéogramme.....	37

## Introduction

Les suspensions sont des répartitions homogènes de particules dans un fluide. Il en existe à l'état naturel mais on les prépare en général dans un but précis.

Nous ne pouvons citer toutes les industries qui emploient des suspensions car elles sont trop nombreuses. Ces suspensions servent à réaliser un mélange homogène de constituants différents comme, par exemple, dans la fabrication des pâtes à ciment. Elles peuvent aussi servir à véhiculer des débris comme dans le forage des puits de pétrole. Le milieu suspensif est le plus souvent un liquide mais il peut être gazeux. On a alors une fluidisation et ce phénomène est fort utilisé pour le transport économique des poudres sèches. La rhéologie des suspensions s'applique donc à des domaines variés.

Or les utilisateurs des suspensions se sont aperçus depuis longtemps que le comportement de celles-ci ne répondait pas à ce que la mécanique classique des fluides visqueux aurait pu prévoir ; Il devenait alors difficile de modifier ce comportement autrement que par des tâtonnements souvent fort coûteux. De là est né le besoin d'étudier plus profondément les caractéristiques des comportements rhéologiques des suspensions pour rendre l'utilisation plus économique.

**Partie 1**

**Partie**

**Bibliographique**

---

*Chapitre 1*  
*Généralités sur la*  
*rhéologie*

---

## I Chapitre 1 : Généralités sur la rhéologie

### I.1 Définition de la rhéologie

La rhéologie est la science de l'écoulement et de la déformation de la matière. Elle décrit l'interrelation entre la force, la déformation et le temps. Le terme « rhéos » provient du grec qui veut dire couler. La rhéologie s'applique à tous les matériaux, des gaz aux solides.

La science de la rhéologie est une science relativement jeune. Elle a été fondée par deux scientifiques réunis à la fin des années 20 et découvrant avoir le même besoin de décrire les propriétés de l'écoulement des fluides. Les scientifiques étaient le professeur Marcus Reiner et le professeur Eugene Bingham. [1]

### I.2 Mouvement laminaire de cisaillement

Lorsqu'une contrainte est appliquée à un liquide, ce dernier se déplace par cisaillement des couches laminaires. En régime laminaire, le liquide peut être modélisé par une succession de couches infiniment minces parallèles aux plaques et parallèles les unes aux autres. La déformation du liquide se fait par glissement successif des couches les unes sur les autres par frottement, sans transport de matière d'une couche à l'autre mais avec transport de quantité de mouvement. Les couches liquides en contact avec les deux surfaces planes sont supposées être solidaires de ces surfaces. [2]

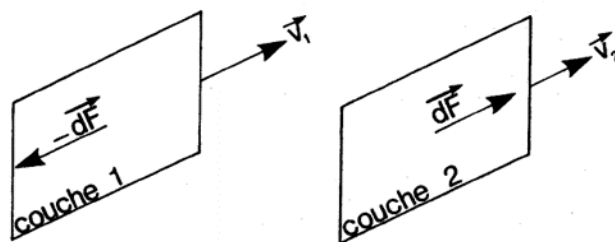
### I.3 Grandeurs fondamentales de la rhéologie

Nous rappellerons dans ce paragraphe les grandeurs fondamentales de la rhéologie ; ce qui nous permettra également d'introduire les notations utilisées dans la suite de ce travail.

#### I.3.1 Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement  $\tau$  est la grandeur fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement de cisaillement simple (cisaillement permanent d'un fluide entre deux plans parallèles par exemple), deux couches successives en contact se déplacent l'une par rapport à l'autre. Les forces de cisaillement, forces de frottement apparaissant à la surface de ces deux couches, s'exercent tangentiellement à leur surface. [3]

Considérons deux éléments de surface infinitésimaux appartenant aux deux couches consécutives (1) et (2) de vitesses parallèles  $\vec{V}_1$  et  $\vec{V}_2$  (figure 1).



**Figure 1:** Forces agissant sur deux éléments de couches voisines [3]

Si l'on suppose que  $|\vec{V}_1| > |\vec{V}_2|$ , il est clair que la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement  $\vec{dF}$  parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). Réciproquement, la couche (2) exerce sur la couche (1) une force de cisaillement  $-\vec{dF}$  tendant à la freiner.

La contrainte de cisaillement est définie comme les forces de cisaillement rapportées à l'unité de surface et est définie par l'équation :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad [3] \quad (1)$$

Où :  $dF$  représente la projection algébrique de  $\vec{dF}$  sur un axe orienté parallèlement au mouvement

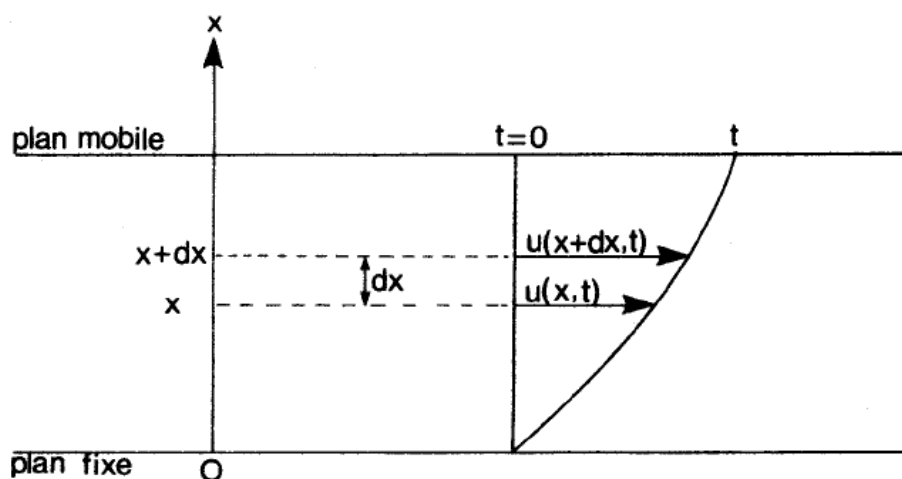
### I.3.2 Déformation

La déformation et la vitesse de cisaillement sont des grandeurs cinématiques fondamentales. Dans le cas où le fluide est cisailé entre deux plans parallèles, le plan supérieur étant en mouvement de translation dans la direction  $x$  à la vitesse  $v$  par rapport au plan inférieur (Figure 2), la déformation due au cisaillement est définie par l'équation :

$$\varepsilon(x, t) = \frac{du(x, t)}{dx} \quad [4] \quad (2)$$

Où :  $u(x, t)$  est la distance parcourue par chaque particule de matière

$x$  : distance séparant la particule de matière du plan solide inférieur.



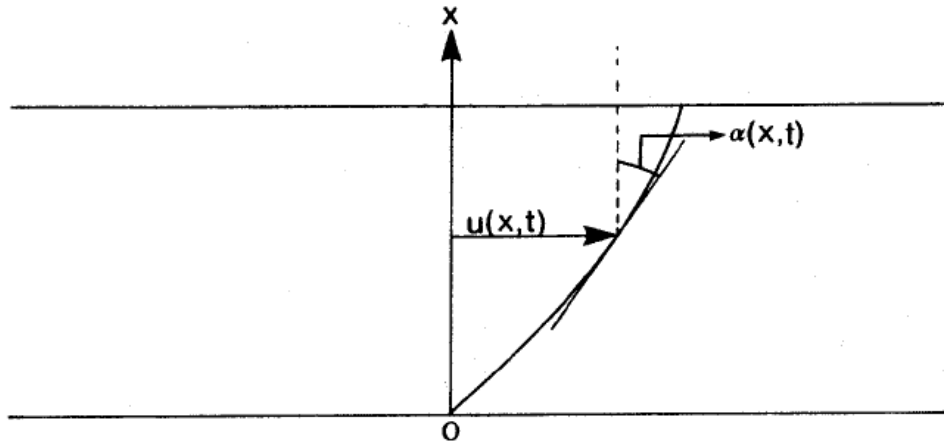
**Figure 2:** Représentation schématique du cisaillement d'un fluide entre deux plans parallèles en mouvement rotatif [3]

La déformation dépend donc du gradient de vitesse généré entre deux couches de fluide infiniment voisines: C'est en effet ce gradient qui caractérise un mouvement de cisaillement pour lequel les différentes couches ont des déplacements relatifs les unes par rapport aux autres.

La déformation de cisaillement  $\varepsilon(x,t)$  ainsi définie est susceptible d'une interprétation géométrique simple, il est clair en effet que :

$$\varepsilon(x,t) = \operatorname{tg}\alpha(x,t)$$

Où  $\alpha(x,t)$  représente l'angle que fait la tangente en  $x$  à la courbe joignant les extrémités des vecteurs de déplacement  $u(x,t)$  et l'axe des  $x$  (figure 3).



**Figure 3:** Schéma représentatif de l'angle entre la tangente et le vecteur de déplacement [3]

Il est clair qu'en général  $\varepsilon(x,t)$  dépend non seulement du temps  $t$  mais encore de  $x$ , c'est-à-dire de la couche considérée .[3]

### I.3.3 Vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement est définie comme la variation temporelle de la déformation, soit encore dans le cas de l'écoulement de cisaillement pur défini précédemment [4]:

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

## I.4 Equation rhéologique d'état et rhéogrammes

### I.4.1 Equation rhéologique d'état

C'est une relation entre la déformation de cisaillement  $\varepsilon$  et la contrainte de cisaillement  $\tau$ . Cette relation dépend de la nature et des propriétés du matériau :  $\varepsilon = f(\tau)$ . [3]

### I.4.2 Rhéogrammes

Les courbes qui traduisent graphiquement l'équation rhéologique d'état sont appelées rhéogrammes.

Les rhéogrammes les plus fréquemment utilisés :

- Les graphes  $\tau, \varepsilon$ , à pression et température extérieures constantes ;
- Les graphes  $\tau, \dot{\varepsilon}$ , à pression et température extérieures constantes ;

- Les graphes  $\varepsilon, t$ , traduisant l'évolution de  $\varepsilon$  au cours du temps à pression et température extérieures constantes, lorsque la contrainte est appliquée à l'instant initial  $t=0$  et maintenue constantes.
- Les graphes  $\tau, t$ , traduisant l'évolution de  $\tau$  au cours du temps à pression et température extérieures constantes, lorsque une déformation est imposée à l'instant initial  $t=0$  et maintenue constante. [3]

### I.5 La viscosité

La viscosité est par définition la résistance au glissement opposée par deux couches de substance, proches l'une de l'autre, lorsqu'elles sont soumises à une contrainte appliquée dans leur plan. Le fluide se comporte ainsi comme une série de couches parallèles dont les vitesses sont proportionnelles à leurs distances au plan fixe. [3]

#### I.5.1 Viscosité dynamique (apparente)

Elle est définie par la relation :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\varepsilon}} \quad (4)$$

**Remarque** : Il existe certaines substances pour lesquelles  $\mu$  ne dépend pas de la contrainte de cisaillement : ces corps sont appelées newtoniens. Leur coefficient de viscosité dynamique est alors appelé viscosité **absolue** noté  $\eta$ .

L'équation rhéologique d'un corps newtonien (l'équation de Newton) s'écrit donc :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\tau}{\eta} \quad [3]$$

Où  $\eta$  n'est fonction que de la température et de la pression extérieure.

#### I.5.2 Viscosité cinématique

L'origine de la viscosité cinématique  $\nu$  en  $[m^2.s^{-1}]$  revient à l'existence des dispositifs de mesure utilisant un temps d'écoulement sous l'effet de la pesanteur. Elle est égale au rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide considéré [3]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

#### I.5.3 Viscosité relative, spécifique, intrinsèque

Dans l'étude des solutions (des dispersions), afin de déterminer les influences respectives du soluté (de la phase dispersée) et du solvant (de la phase dispersante) dans le comportement rhéologique, on utilise fréquemment les coefficients de viscosités suivants [3] :



- **Viscosité relative**

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_s} \quad (6)$$

- **Viscosité spécifique**

$$\mu_{sp} = \frac{\mu - \mu_s}{\mu_s} = \mu_{rel} - 1 \quad (7)$$

- **Viscosité intrinsèque**

$$[\mu] = \lim_{\substack{c \rightarrow 0 \\ \varepsilon \rightarrow 0}} \frac{\mu_{sp}}{c} \quad (8)$$

Où  $\mu_s$  et  $\mu$  représentent respectivement la viscosité dynamique de la solution (de la dispersion) et du solvant (la phase dispersée).

$\mu_{rel}$  et  $\mu_{sp}$  sont des grandeurs sans dimension.

$[\mu]$  Est homogène à l'inverse d'une concentration.

---

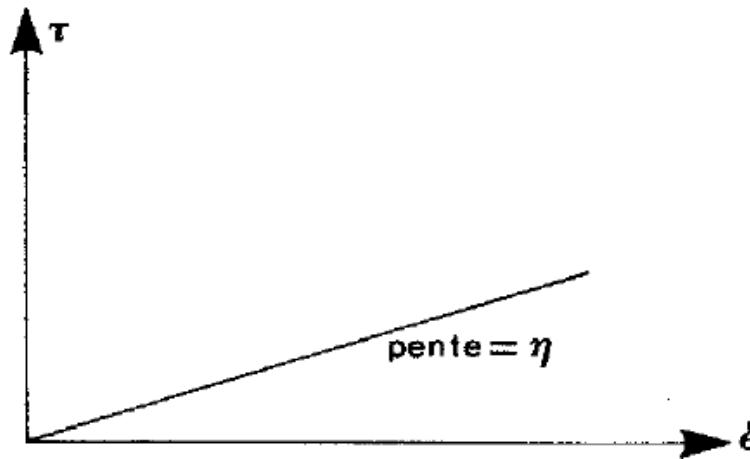
*Chapitre 2*  
*Typologie des*  
*écoulements*

---

## II Chapitre 2 : Typologie des écoulements

### II.1 Le comportement newtonien

Un liquide est dit newtonien lorsque le tenseur des contraintes visqueuses est une fonction linéaire du tenseur des déformations. Pour les liquides newtoniens, il existe une proportionnalité entre la contrainte de cisaillement  $\tau$  et la vitesse de cisaillement  $\dot{\epsilon}$  qui s'exprime sous la forme :  $\tau = \eta \dot{\epsilon}$ . [5]



**Figure 4:** Rhéogramme d'un fluide newtonien [7]

Ce comportement à l'écoulement est le plus simple. Dans ce cas, la viscosité dynamique est indépendante de la vitesse de cisaillement.

### II.2 Le comportement non-newtonien

De nombreux autres liquides ne présentent pas ce comportement simple, observé dans le cas des fluides newtoniens, lors de l'écoulement. Leurs viscosités dites « apparentes » dépendent de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement. Ils sont dits « non newtoniens ». Un tel comportement est lié aux propriétés physico-chimiques du fluide étudié, à la taille des particules ainsi qu'à leur concentration dans la phase continue.

Les fluides non newtoniens peuvent être divisés en deux grandes catégories :

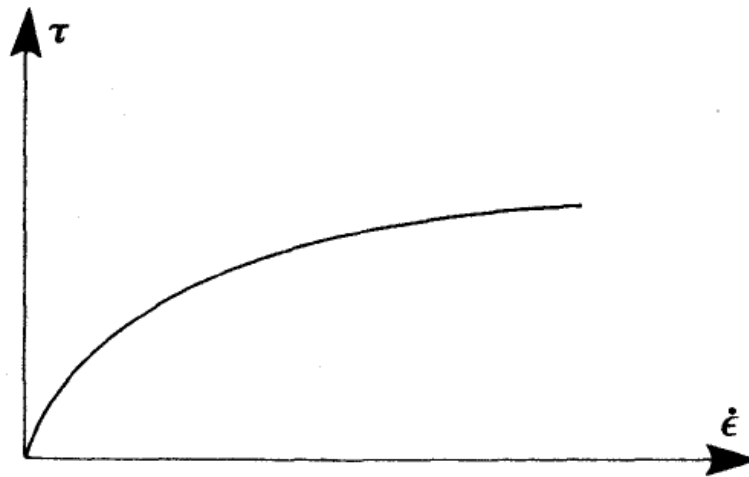
#### II.2.1 Comportement non-newtonien indépendant du temps

Une variation du cisaillement peut entraîner une variation de la viscosité du liquide. Les liquides peuvent être ainsi classés suivant la relation entre leur viscosité et leur taux de cisaillement.

➤ **Les liquides sans contrainte critique**

**a) Les liquides rhéofluidifiants**

La viscosité des fluides pseudo-plastiques diminue quand la contrainte de cisaillement croît. Ce phénomène s'explique par des modifications de la structure du fluide entre les états de repos et d'écoulement. Au repos, l'ordre interne irrégulier de ces fluides provoque une résistance interne importante ce qui implique une viscosité élevée. À la suite de l'augmentation de la contrainte de cisaillement, les particules en suspension se positionnent dans le sens de l'écoulement, d'où un meilleur glissement et donc une baisse de la viscosité. Les fluides reviennent à leur viscosité initiale (réversibilité) si l'effet de cisaillement s'arrête ou diminue. [6]



**Figure 5: Rhéogramme d'un liquide rhéofluidifiant [7]**

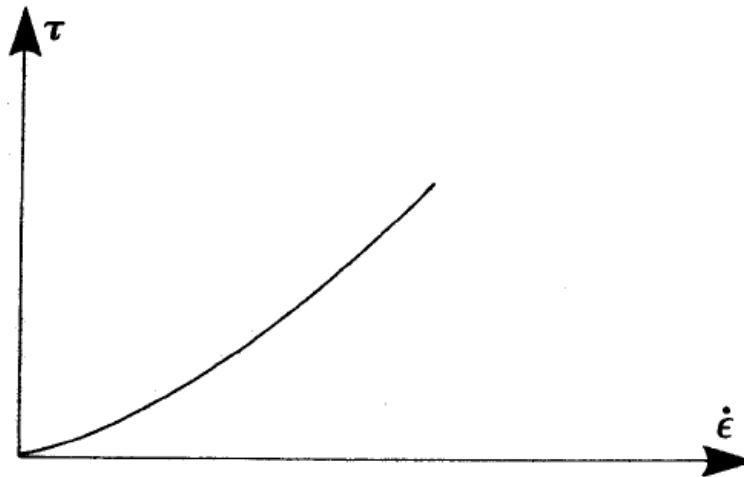
Parmi les fluides pseudo-plastiques, on rencontre, par exemple : les solutions et les suspensions aqueuses concentrées (solutions d'alginate de sodium, de certains polymères, jus de fruits concentrés...), les pétroles, latex de caoutchouc, pâte à papier, colles, savon, certaines peintures, purées (de bananes, de pommes de terre), mayonnaise, sang humain, etc...

**b) Liquides dilatants (ou rhéoépaississants)**

À l'inverse des fluides pseudo-plastiques, les fluides dilatants ont une viscosité apparente qui croît quand la contrainte de cisaillement augmente. Ce comportement, moins fréquent que celui des fluides pseudo-plastiques, se rencontre dans les suspensions fortement concentrées, dans lesquelles la phase liquide n'occupe pratiquement que les interstices entre les particules solides.

Dans ce cas, quand le taux de glissement croît, les particules solides tendent à freiner le déplacement d'une couche par rapport à l'autre. L'accroissement des frottements, dû à la disparition du liquide interstitiel lors de la mise en mouvement du milieu, fait apparaître des cavités et la viscosité dynamique apparente augmente. On observe ce type de

comportement, par exemple, avec des solutions aqueuses d'amidon ou avec du sable et du quartz dans l'eau. [6]



**Figure 6:** Rhéogramme d'un liquide rhéoépaississant [7]

Aucune équation mathématique ne peut prétendre décrire exactement et rigoureusement le comportement d'un liquide le plus général. De nombreuses équations ont été proposées ; nous présentons ci-après les plus intéressantes et les plus utilisées :

❖ Oswald-de-Waele (1925)

C'est une loi de puissance, décrite par les relations :

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

où  $k$  représente la consistance du fluide et  $n$  l'indice de fluidification.

Cette loi décrit le cas des fluides à comportement indépendant du temps, qui peuvent présenter un comportement rhéofluidifiant ou rhéoépaississant.

- Lorsque  $n < 1$  (rhéofluidification)  $\eta$  décroît quand  $\dot{\epsilon}$  croît.
- Dans le cas contraire quand,  $n > 1$  (rhéoépaississement),  $\eta$  croît avec  $\dot{\epsilon}$ .
- Pour  $n = 1$ , on retrouve le fluide Newtonien.[6]

❖ Modèle de Cross (1965) [8]

Ce modèle, comme celui de Carreau-Yassuda, [6][9] tient compte des limites du comportement rhéologique. Aux faibles contraintes de cisaillement, on observe généralement un comportement Newtonien, avec un plateau de viscosité appelée viscosité à cisaillement nul et désignée par «  $\eta_0$  » (Pa.s). Aux cisaillements élevés, un deuxième plateau apparaît et la viscosité est appelé viscosité à cisaillement infini désignée par «  $\eta_\infty$  » (Pa.s).

Le modèle de Cross s'écrit :

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (\lambda \dot{\epsilon})^n} \quad (10)$$

Où  $\lambda$  et  $n$  sont des constantes;  $\lambda$  est un temps caractéristique de relaxation.  $\eta_0$  et  $\eta_{\infty}$  sont les viscosités respectives à cisaillement nul et infini.

➤ **Les liquides avec contrainte critique**

**Liquides rhéoplastiques (ou viscoplastiques)**

Avec les liquides rhéoplastiques, l'écoulement ne se produit qu'à partir d'un seuil minimal de contrainte  $\tau_0$ , appelé seuil de plasticité, au-delà duquel on peut retrouver – suivant le fluide – les comportements Newtoniens, pseudo-plastiques ou dilatants. Dans le cas de ces liquides, la courbe d'écoulement coupe l'ordonnée en un point définissant la contrainte critique. Le phénomène est réversible. Il est possible d'expliquer qualitativement ce comportement en supposant que ce dernier présente au repos une structure tridimensionnelle rigide, qui rend les substances assimilables à un solide, susceptible de résister à des contraintes inférieures à  $\tau_c$ . Dès que l'on dépasse cette contrainte, la structure se détruit complètement et l'écoulement s'effectue sous l'effet de la contrainte effective  $\tau - \tau_c$ . [6]

Selon le comportement du liquide au-delà du seuil d'écoulement, on distingue deux types de fluide rhéoplastique :

**a) Liquides de Bingham**

Au-delà du seuil d'écoulement  $\tau_c$ , ils se comportent comme des liquides newtoniens : toute augmentation de  $\tau$  se traduit par une augmentation proportionnelle de  $\dot{\epsilon}$  (figure 7). Leur équation rhéologique d'état s'écrit par conséquent [7]:

$$\begin{aligned} \text{➤} \quad \tau < \tau_c & \quad \dot{\epsilon} = 0 \\ \text{➤} \quad \tau > \tau_c & \quad \tau = \tau_c + \alpha \dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (11)$$

Où  $\alpha$  est un coefficient appelé viscosité plastique.

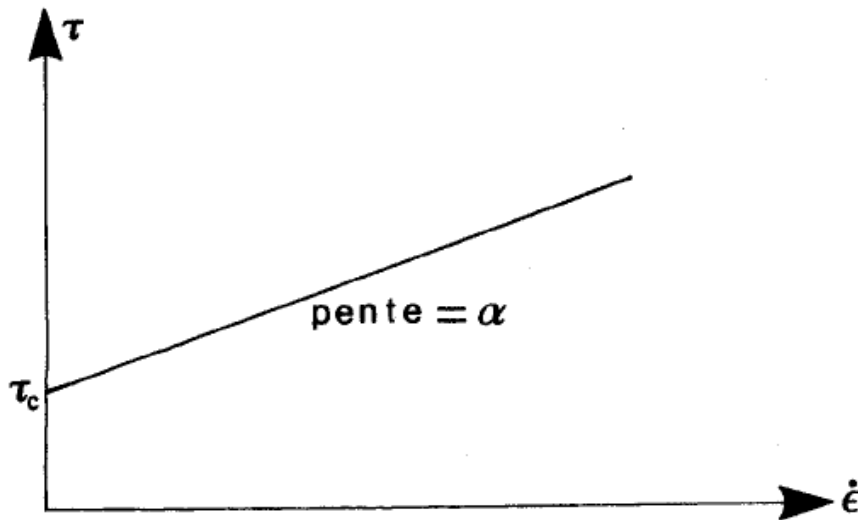


Figure 7: Rhéogramme d'un liquide de Bingham [7]

Un exemple connu de corps de Bingham est celui des peintures à l'huile étudiée historiquement précisément par Bingham. Les huiles utilisées dans ces préparations sont des liquides visqueux newtoniens. On pourrait donc penser qu'il en est de même de ces peintures qui en sont des suspensions. Or, les fabricants ont mis au point des compositions qui ont la propriété de s'étaler facilement et de ne pas laisser de trace de pinceau (Ce qui suppose une faible viscosité sous contrainte), et d'autre part celle de ne pas couler (ce qui implique une forte viscosité au repos). Ces peintures ont une viscosité apparente décroissante avec le cisaillement comme celle d'un corps de Bingham. [7]

Il s'agit là d'un comportement plastique idéal.

#### b) Liquides de Casson

A l'opposé des précédents, ils manifestent un comportement plastique non idéal qui se traduit par le fait que leur rhéogramme présente le plus souvent une concavité dirigé vers le bas (figure 8). Il s'agit donc d'un comportement plastique fluidifiant. A noter que le comportement plastique épaississant semble excessivement peu fréquent pour ne pas dire inexistant.

La plupart des liquides plastiques sont des liquides de Casson, comme par exemple les boues, les pâtes dentifrices, la pâte à pain, des matières grasses, des suspensions de sulfate de zinc ou de Baryum. Pour décrire quantitativement un tel comportement, on utilise essentiellement deux équations[7] :

❖ Equation de Casson :

$$\begin{aligned} \rightarrow \tau < \tau_c & \quad \dot{\epsilon} = 0 \\ \rightarrow \tau > \tau_c & \quad \tau^{0.5} = \tau_c^{0.5} + (\beta \dot{\epsilon})^{0.5} \end{aligned} \quad (12)$$

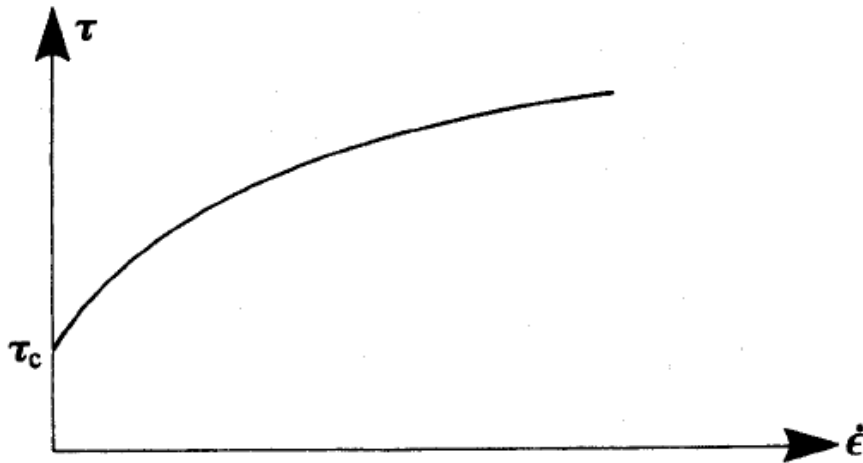
Où  $\beta$  est une constante appelée également viscosité plastique.

❖ Equation de Herschel-Bulkley

Elle est de type lois de puissance avec seuil d'écoulement [7] :

$$\begin{aligned} \text{➤ } \tau < \tau_c & \quad \dot{\epsilon} = 0 \\ \text{➤ } \tau > \tau_c & \quad \tau = \tau_c + k\dot{\epsilon}^n \end{aligned} \quad (13)$$

Où  $n$  est un exposant à déterminer dont la valeur est le plus souvent inférieure à l'unité (comportement plastique fluidifiant).



**Figure 8:** Rhéogramme d'un liquide de Casson [7]

### II.2.2 Comportement non-newtonien dépendant du temps

Certains fluides peuvent présenter des caractéristiques d'écoulement dépendant des traitements antérieurs qu'ils ont subis.

#### a) Liquides thixotropes

Les fluides thixotropes ont, pour un gradient de vitesse constant, une viscosité qui diminue avec la durée de cisaillement. Ils admettent un seuil de contrainte comme les fluides rhéoplastiques, mais ce seuil augmente avec le temps quand le fluide est au repos et s'abaisse après agitation.

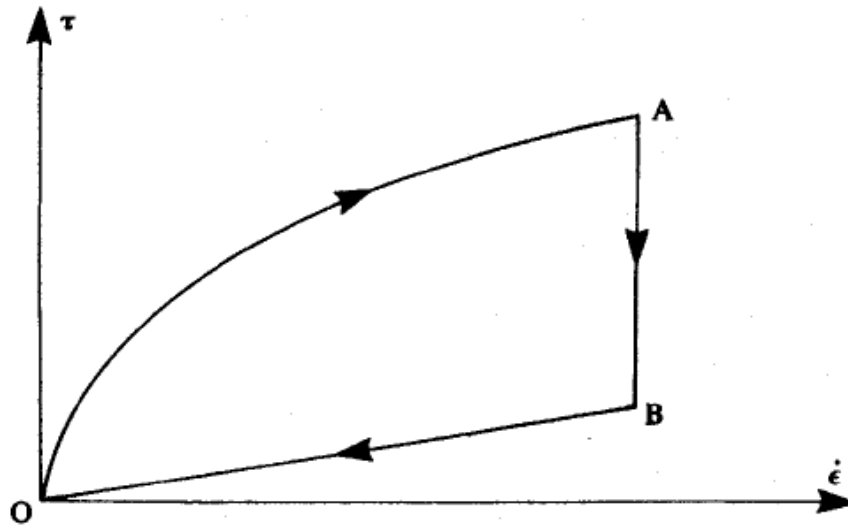
Ce comportement s'observe quand les phénomènes d'alignement ou de formation de cavités, décrits respectivement pour les fluides pseudo-plastiques et dilatants, se déroulent lentement, de telle sorte que, même dans un écoulement permanent, on constate une diminution ou une augmentation de la contrainte de cisaillement.

La thixotropie est un phénomène rhéologique de grande importance industrielle car il peut être soit néfaste dans le cas du démarrage d'installations de pompage, soit recherché lorsqu'on souhaite disposer d'un matériau qui se liquéfie quand on le met en œuvre et qui se raidit quand on le stocke. C'est le cas des encres d'imprimerie, des mélanges eau-alcool,



des sels de pentaoxyde de vanadium, des gels, de la mayonnaise, du blanc d'œuf frais, etc. Ces fluides sont en règle générale pseudo-plastiques.

Lorsqu'il est soumis à des taux variables de cisaillement, un fluide thixotrope va réagir comme illustré dans la figure ci-dessous.



**Figure 9:** Boucle d'hystérésis de référence de gel fluidifiant [7]

Un tracé de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement est réalisé en augmentant le taux de cisaillement jusqu'à une certaine valeur, puis en le réduisant immédiatement, jusqu'au point de départ. Notons que les courbes "ascendante" et "descendante" ne coïncident pas. Ce cycle d'hystérésis est provoqué par la diminution de la viscosité du fluide avec l'augmentation du temps de cisaillement. Ce type d'effet peut être, ou ne pas être, réversible ; certains fluides thixotropes, si on les laisse reposer un moment, récupèrent leur viscosité initiale, alors que d'autres ne la retrouvent jamais. [10]

**b) Liquides rhéopexes (ou anti-thixotropes)**

Extrêmement complexe, le phénomène de rhéopexie n'a été que très peu étudié. Il apparaît que, dans ce type de fluides, un faible cisaillement est susceptible de favoriser la restructuration du produit. On peut observer la rhéopexie dans les émulsions d'eau dans de l'huile ou la cristallisation du plâtre à faible cisaillement.

Pour les fluides thixotropes et rhéopexes, les phénomènes observés sont réversibles. Ainsi, l'agitation d'un gel peut le fluidifier mais, au bout d'un certain temps, l'agitation ayant cessé, le gel se reforme. [11]

**c) Liquides viscoélastiques**

La viscoélasticité est définie comme caractérisant un comportement mécanique particulier intermédiaire entre le comportement d'un solide idéal dit "Hookéen" et celui d'un liquide idéal dit "newtonien". La réponse d'un matériau viscoélastique à une déformation est alors un couplage entre la réponse d'un fluide visqueux (contrainte proportionnelle à la vitesse de déformation) et celle d'un solide élastique (contrainte proportionnelle à la déformation).

Cela revient à considérer que les propriétés mécaniques observées sont de façons générales dépendantes du temps ou de ses quantités dérivées.

Ainsi, une contrainte appliquée engendre une déformation dans le temps et vice versa, ce qui traduit que les propriétés mécaniques d'un matériau viscoélastique évoluent dans le temps et dépendent de l'histoire des sollicitations. **[11]**

---

*Chapitre 3*  
*Rhéométrie et*  
*dispositifs*  
*expérimentaux*

---

## **III Chapitre 3 : Rhéométrie et dispositifs expérimentaux**

### **Introduction**

Pour caractériser les propriétés rhéologiques des matériaux fluides, l'un des moyens incontournables qu'il faut pouvoir mettre en œuvre est le rhéomètre. Un rhéomètre permet de déplacer le fluide dans un état d'écoulement contrôlé et, dès lors qu'un certain nombre de précautions sont prises, d'accéder aux grandeurs physiques pertinentes qui permettent de décrire le comportement du matériau dans la gamme de sollicitation intéressante pour les propriétés de la mise en forme du fluide, les propriétés d'usage, les propriétés en fin de vie... Les rhéomètres rotatifs et capillaires sont les plus connues, les plus utilisés et les mieux maîtrisés. Parmi les écoulements les plus couramment utilisés, le cisaillement simple et permanent entre deux plans parallèles infinis, et particulièrement adapté à l'analyse du comportement visqueux et élastique des fluides complexes. [12]

Dans la présente étude, nous avons travaillé avec des rhéomètres rotatifs, à contrainte imposée, équipés d'une géométrie cylindrique coaxiale. Il s'agit du viscosimètre Brookfield DV-I +.

### **III.1 Principe de fonctionnement**

Le principe du fonctionnement du DV-I + est de conduire un mobile (qui est immergée dans le fluide d'essai) à travers un ressort calibré. La traction visqueuse du fluide contre le mobile est mesurée par la déviation du ressort. La déviation du ressort est mesurée avec un transducteur rotatif. La plage de mesure d'un DV-I + (en centipoise ou milliPascal secondes) est déterminée par la vitesse de rotation du mobile, la taille et la forme du mobile, le conteneur dans lequel le mobile tourne et le couple à pleine échelle du ressort calibré. [13]

### **III.2 Variables liées au viscosimètre**

La plupart des viscosités fluides se révèlent non newtoniennes. Elles dépendent du taux de cisaillement et de la géométrie du mobile (*spindle*). Les spécifications du mobile de viscosimètre et de la géométrie de la cuve affecteront les relevés de viscosité. Si une lecture est prise à 2,5 tr / min et une seconde à 50 tr / min, les deux valeurs de viscosité produites seront différentes parce que les lectures ont été effectuées à des vitesses de cisaillement différentes.

Plus la vitesse du mobile est rapide, plus le taux de cisaillement est élevé. Le taux de cisaillement d'une mesure donnée est déterminé par: la vitesse de rotation du mobile, la taille et la forme du mobile, la taille et la forme du récipient utilisé et donc la distance entre la paroi du récipient et la surface du mobile. Un test de viscosité répétable devrait contrôler ou spécifier ce qui suit:

- Température d'essai
- Taille du récipient d'échantillon (ou géométrie du spindle / chambre)

- Volume d'échantillon
- Modèle de viscosimètre
- Mobile utilisé
- Vitesse d'essai (ou taux de cisaillement)
- Durée ou nombre de tours du mobile pour enregistrer la viscosité. [13]

### III.3 Mesures de la viscosité du fluide

Pour un mobile donné (Spindles : S61-S64), on fait varier les vitesses de rotation et pour chaque vitesse on lit sur l'écran deux valeurs. La première correspond à la viscosité du fluide et la seconde définit le taux de cisaillement.

La vitesse de déformation (*shear rate*) est définie par la formule :

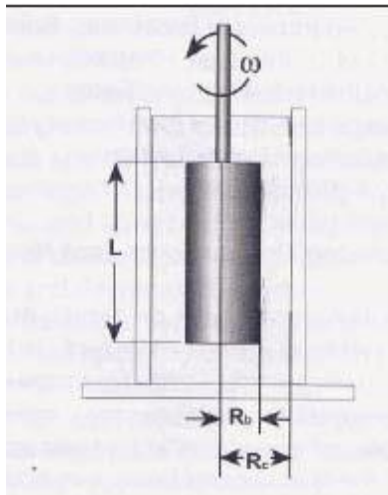
$$\dot{\epsilon} = \frac{2R_b^2 \cdot \omega}{(R_c^2 - R_b^2)} \quad [14] \quad (14)$$

Avec :

$$\omega = 2\pi N/60.$$

$R_c$  : rayon du contenant.

$R_b$  : rayon de l'élément choisi.



**Figure 10:** Caractéristiques géométriques de deux cylindres coaxiaux [14]

### III.4 Mesures du taux de cisaillement

Le taux de cisaillement (*shear stress*) est exprimé par la formule :

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L} \quad [14] \quad (15)$$

**M** : moment de cisaillement.  $M = \eta \cdot 673,7$ .

**L** : hauteur de l'élément.

**Remarque** : Les dimensions des différents mobiles sont indiquées dans l'annexe 1.

---

*Chapitre 4*  
*Etude bibliographique*  
*d'une suspension de*  
*ZnO*

---

## IV Chapitre 4 : Etude bibliographique d'une suspension de ZnO

### IV.1 Oxyde de Zinc

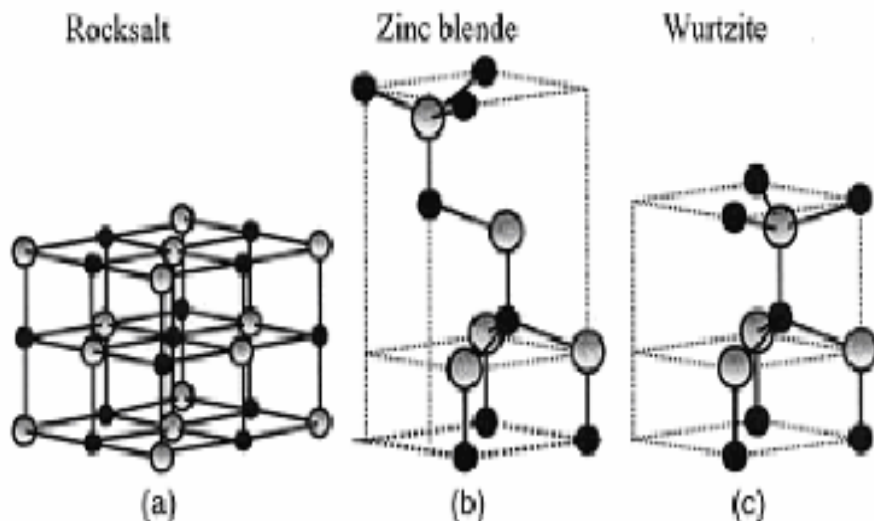
#### IV.1.1 Définition

Caractérisé par sa formule chimique ZnO, l'oxyde de zinc a pour propriété d'être insoluble dans l'eau. Cet oxyde amphotère n'est soluble que dans des solutions acides ou basiques. Il prend l'apparence d'une poudre blanchâtre qui est souvent appelée blanc de zinc ou zinc blanc. [15]

#### IV.1.2 Structure

L'oxyde de zinc peut cristalliser selon trois formes : la structure wurtzite hexagonale, la structure zinc blende et la structure rocksalt. Comme il est schématisé sur la figure 11. Le ZnO se cristallise généralement selon la phase hexagonale compacte B4 (Wurtzite), qui est stable dans les conditions normales. [16]

Cependant il peut être synthétisé selon la phase cubique B3 (Blende) lorsqu'il est déposé sur certains substrats de symétrie cubique sous des pressions élevées. L'application d'une grande pression hydrostatique (10-15 GPa) au ZnO de structure Wurtzite, le transforme en phase B1 (Rocksalt) qui est métastable. [17]



**Figure 11:** Représentation des structures cristallines du ZnO : **(a)** Rocksalt cubique, **(b)** zinc blende, **(c)** hexagonale Wurtzite. Atome de zinc en gris et oxygène en noir. [18]

**IV.1.3 Propriétés typique du ZnO**

**Tableau 1:** Propriétés de l'oxyde de zinc [19]

Propriétés	Spécifications
Masse molaire	81,4 g/mol
Masse volumique	5,6 g·cm <sup>-3</sup>
Température de fusion	1 975 °C

**IV.1.4 Utilisations**

L'oxyde de zinc présente une large gamme d'utilisations. Il est utilisé dans la fabrication de caoutchouc, d'objets en caoutchouc, de pneumatiques, dans la fabrication de produits chimiques dérivés du zinc, dans le verre, les céramiques et les ferrites. Il est employé dans les peintures, comme additif dans les lubrifiants et le fioul, comme catalyseur en chimie. Il est également utilisé en alimentation animale, dans les cosmétiques (écrans antisolaire) et dans les médicaments. [20]

**IV.2 Carboxyméthylcellulose de sodium**

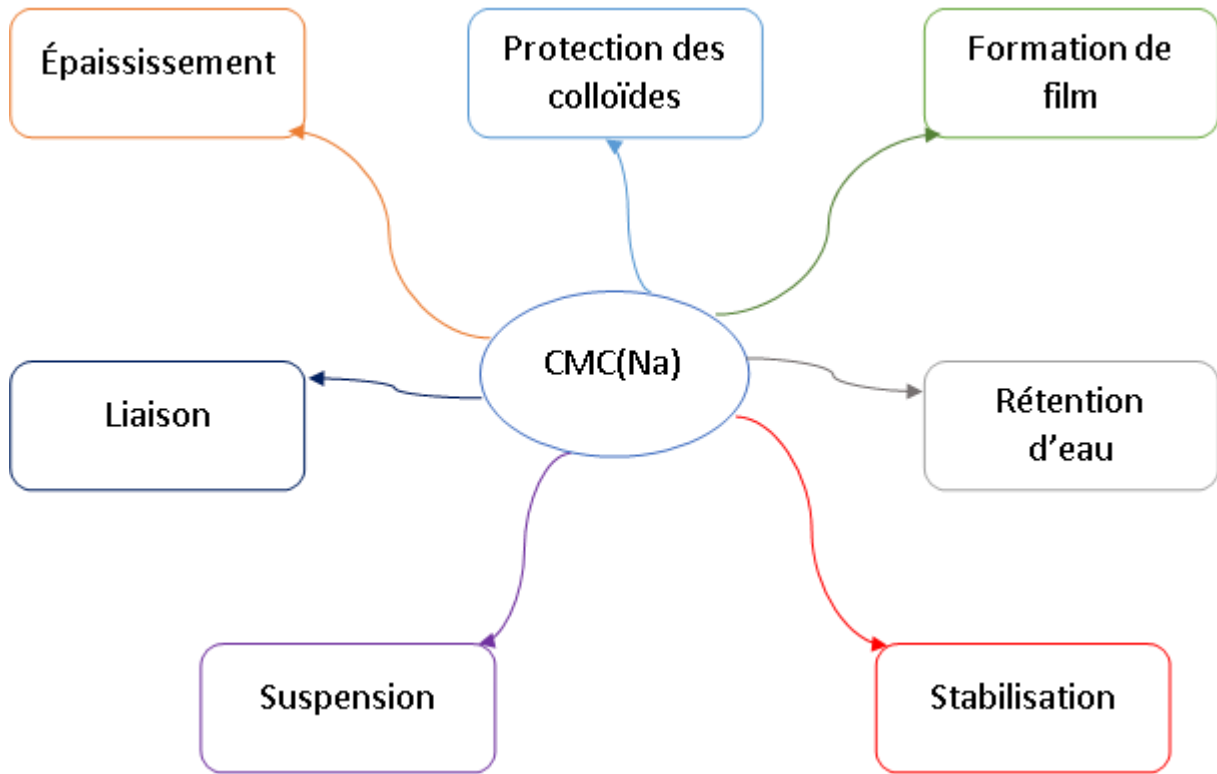
**IV.2.1 Définition**

La Carboxyméthylcellulose de sodium CMC(Na) est le nom générique d'une série d'éthers cellulose obtenus par réaction de celluloses présentant des caractéristiques définies et de monochloracétate de sodium ou d'acide monochloracétique. [21]

La CMC(Na) purifiée est une substance granulaire blanche grisâtre, présentée sous forme de poudre non-toxique, inodore, biodégradable. Elle ne favorise pas de réactions allergiques chez l'homme [22]. La CMC peut être dissoute dans l'eau chaude ou froide.

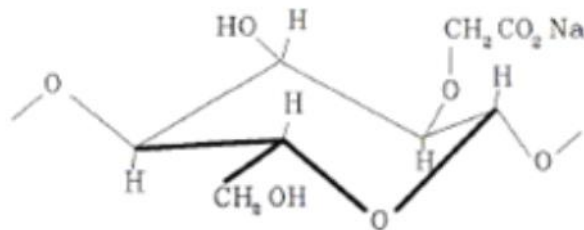
La CMC est disponible à différents niveaux de viscosité. Parmi les propriétés les plus importantes qui la rendent utile dans plusieurs applications, on note son aptitude à former des solutions très visqueuses à basses concentrations, ses propriétés épaississantes et tensioactives. [23] [24]





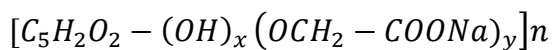
**Figure 12:** Fonctions et propriétés de la CMC (Na)

La CMC(Na) a la structure suivante :



**Figure 13:** Structure de la carboxyméthylcellulose de sodium [21]

Et sa formule molaire est : [21]



$$x \geq 2.$$

$$y \leq 1 \quad 100 \leq n \leq 2000.$$

$$x + y = 3.$$

**IV.2.2 Rhéologie des solutions de CMC(Na)**

De nombreux travaux traitent des propriétés rhéologiques des solutions aqueuses de CMC(Na). [25], [26]. Ces travaux ont montré que la viscosité intrinsèque décroît lorsque le gradient de vitesse augmente.

D'autre part, lorsque la concentration augmente, les solutions de CMC présentent un comportement rhéofluidifiant, viscoélastique. [27]

Ghannam, Esmail et Al. [28] ont effectué une étude rhéologique complète, dans la gamme de concentration allant de 1 à 5%. Le comportement non Newtonien est de plus en plus marqué lorsque la concentration augmente. Les fluides sont rhéofluidifiants, thixotropes et viscoélastiques.

K. Ben Azouz [29] a effectué une étude rhéologique complète de trois échantillons de CMC(Na) de masses moléculaires différentes dans des gammes de concentration allant du régime dilué au régime semi-dilué voire concentré (0.1-2.5%), elle a constaté que les solutions étudiées ont un comportement rhéofluidifiant qui a pu être modélisé à l'aide du modèle de Cross.

**Partie 2**

Partie

Expérimentale

## Introduction

Nous nous proposons, dans cette partie, d'étudier le comportement rhéologique d'une suspension de 3% de ZnO en présence de CMC(Na).

## I Mode opératoire

### I.1 Préparation de la suspension

- ✓ Dans un bécher on met 100 mL d'eau distillée
- ✓ Sous agitation à une vitesse de 480 tr/min à l'aide d'un agitateur mécanique de marque Heidolph (annexe 03), nous ajoutons 2.5 g de CMC(Na) par petites quantités pour obtenir une bonne dissolution.
- ✓ Sous la même agitation on ajoute 0.6 g d'agent mouillant (Laurylsulfate de sodium)
- ✓ Finalement on ajoute une quantité de 3 g d'oxyde de zinc par petites quantités
- ✓ On maintient l'agitation pendant 30 min.
- ✓ On termine par homogénéiser le mélange avec IKA T10 (annexe 03) pendant 5 min.

### I.2 Mesure de la viscosité

Les mesures sont réalisées à l'aide du viscosimètre Brookfield DV-I + décrit au chapitre 3 (photo dans l'annexe 03).

La méthode consiste à appliquer un gradient de vitesse allant de 0.5 jusqu'à 100 tr/min en utilisant le mobile (Sp 62).

Ce viscosimètre affiche sur son écran la valeur de la viscosité en cP et le couple de torsion M, exprimé en %. Selon la méthode décrite dans la partie bibliographique, nous avons calculé le taux  $\tau$  et la vitesse de cisaillement  $\dot{\epsilon}$ .

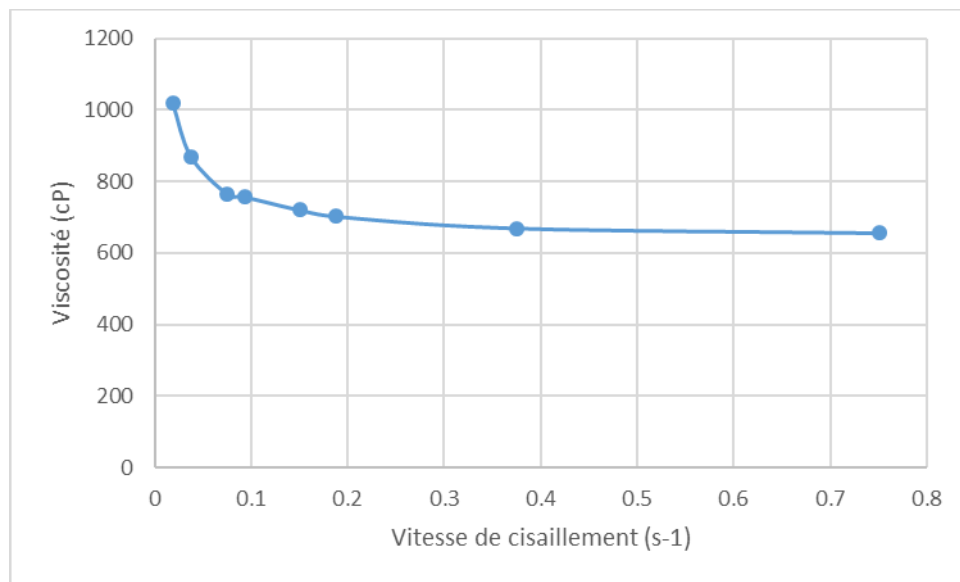
## II Résultats obtenus

Les tableaux suivants illustrent les résultats obtenus :

**Tableau 2:** Résultats de l'analyse rhéologique

N(tr/min)	Viscosité (cP)	%	$\tau$ (dyne/cm <sup>2</sup> )	$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )
0.5	1020	1,7	3,03445	0,018776
1	870	2,9	5,176415	0,037551
2	765	5,1	9,103351	0,075102
2.5	756	6,3	11,24532	0,093878
4	720	9,6	17,13572	0,150205
5	702	11,7	20,88416	0,187756
10	669	22,3	39,80485	0,375511
20	655,5	43,7	78,00322	0,751023
50	/	/	/	/
100	/	/	/	/

La courbe viscosité obtenue en fonction de la vitesse de cisaillement ainsi que le rhéogramme sont représentées ci-dessous :



**Figure 14:** Courbe de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement

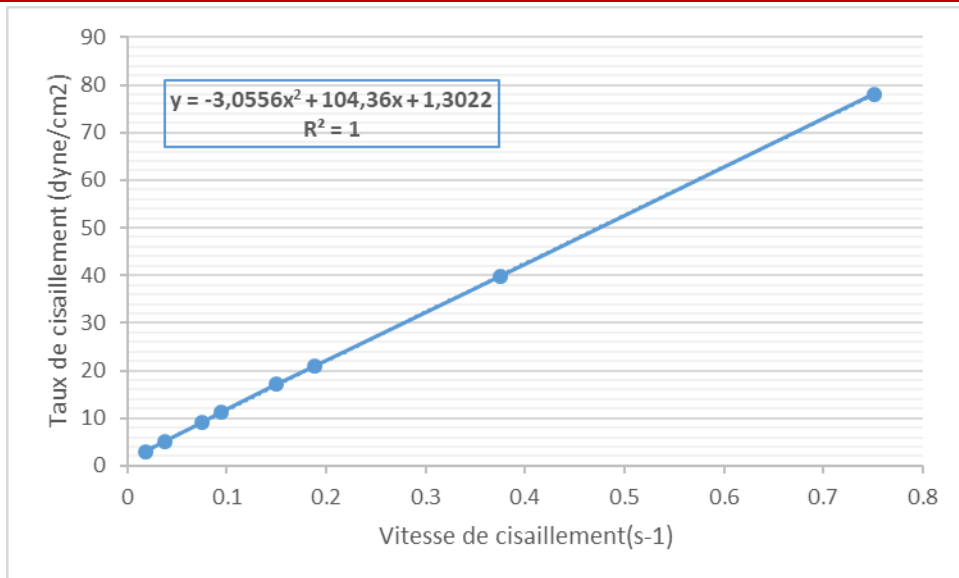


Figure 15: Rhéogramme de la suspension ZnO

### ✓ Interprétation des résultats

D'après la figures 14, la viscosité diminue avec la vitesse de cisaillement ce qui indique que la suspension a un comportement rhéofluidifiant confirmé par l'allure du rhéogramme présenté par les figure 15.

On explique la diminution de la viscosité par l'alignement des unités structurales au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement augmente en favorisant l'écoulement des différentes couches de liquide.

Une autre interprétation moléculaire consiste à envisager une modification de structure du liquide soit par une rupture de liaisons ou défloculation de particules en fonction de la vitesse de cisaillement.

### III Modélisation du comportement

La figure 16 montre la représentation log-log du rhéogramme de la suspension d'oxyde de zinc.

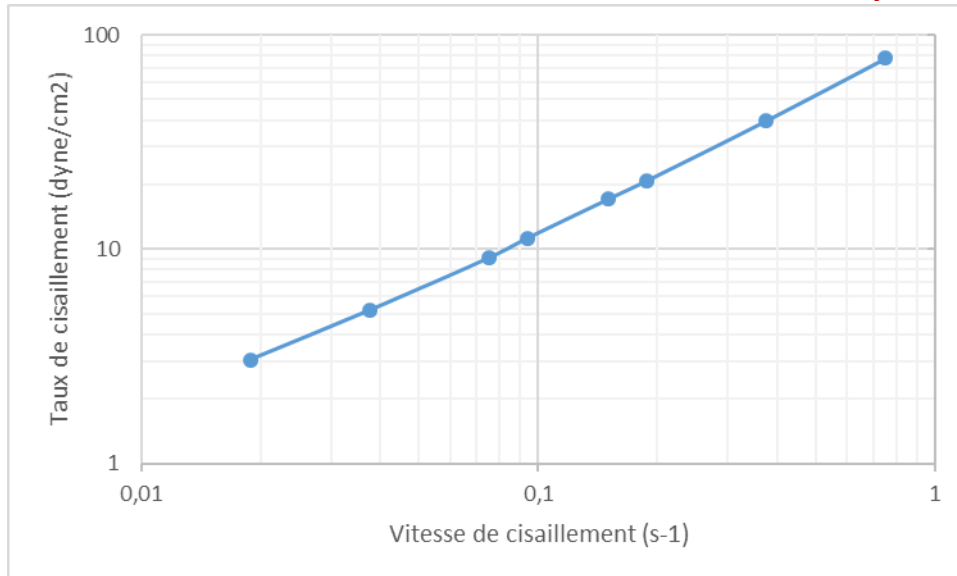


Figure 16: Représentation log-log du rhéogramme

Les figures 14 et 15 décrivent un comportement rhéofluidifiant de la suspension d'oxyde de zinc. Ce comportement peut être modélisé par la loi de puissance :

$$\tau = k\dot{\epsilon}^n$$

Dont les paramètres sont calculés à partir de la courbe log-log du rhéogramme (figure 16):

**n=0.95**

**k=102.402**

La valeur de n, comprise entre 0 et 1, est caractéristique d'un comportement rhéofluidifiant.

D'après les résultats des études concernant l'identification, le comportement de la suspension d'oxyde de zinc est similaire à celui d'une solution de carboxyméthylcellulose mentionné dans le chapitre 4 [25] [26] [27] [28] [29].

## **Conclusion**

Le but de ce travail est d'étudier le comportement rhéologique d'une suspension d'oxyde de zinc où le ZnO est dispersé dans une solution de carboxyméthylcellulose de sodium.

Nous avons trouvé que cette suspension a un comportement rhéofluidifiant identique à celui des solutions de CMC(Na). Nous avons modélisé ce comportement par la loi de puissance et nous avons déterminé les paramètres du modèle.



## Références

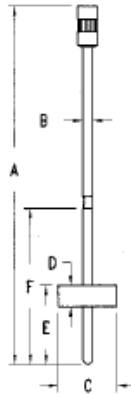
- [1] Gresol: Grupo de Reologia em Sistemas Organizados, Prof. Dra. Maria Regina Alcantara About Rheology - IQ-USP. Disponible sur:  
<[http://www.iq.usp.br/mralcant/About\\_Rheo.html](http://www.iq.usp.br/mralcant/About_Rheo.html)>
- [2] P. Coussot., J.L. Grossiord. Comprendre la rhéologie de la circulation du sang à la prise du béton. EDP sciences (2001)
- [3] G. Couarraze., J.L. Grossiord. Chapitre 1 : généralités. In : initiation à la rhéologie. Edition. Paris: TEC & DOC (2000), p. 3-11. ISBN :2-7430-0285-9.
- [4] N. Midoux., Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimique. Paris. Editions Tec et Doc, (1993).
- [5] Ferguson J., Kemblowski Z., Applied Fluid Rheology, London; New York: Elsevier Applied Science (1991). ISBN: 1851665889.
- [6] H.A. Barnes., J.F. Hutton et K. Walters., An introduction to rheology. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, (1989).
- [7] G. Couarraze., J.L. Grossiord. Chapitre 3: Typologie des différents modes d'écoulement. In : *initiation à la rhéologie*. Edition. Paris: TEC & DOC (2000), p. 65-83. ISBN: 2-7430-0285-9.
- [8] M.M. Cross., Rheology of Non-Newtonian Fluids (1965). A new flow equation for pseudo-plastic systems", *Journal of Colloid Sciences*, 20: 417-437.
- [9] R B. Bird., R.C. Armstrong et O. Hassager., Dynamics of Polymeric Liquids. New York: Wiley, (1987).
- [10] Gillet Steve, D.Sc : La viscosité. Disponible sur le web:  
<[perso.latribu.com/shagar/steve/pdf/sa3.pdf](http://perso.latribu.com/shagar/steve/pdf/sa3.pdf)>.
- [11] H.A. Barnes. A handbook of elementary rheology. University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics (2000).
- [12] N. El Kissi., S. Nigen et F. Pignon. Chapitre 3 : Glissement et fracturation dans les fluides complexes. Interpréter les essais rhéométriques. La mesure en rhéologie. France : Groupe français de rhéologie (GFR) (2013), p49. ISBN :978-2-7598-0623-2.
- [13] Manuel d'utilisation du viscosimètre Brookfield DV-I + : Brookfield engineering laboratories, Inc. USA. MA 02346-1031
- [14] Manuel d'utilisation du viscosimètre Brookfield DV-I +: More solutions to sticky problems (A guide to getting more from your Brookfield viscometer).
- [15] <http://sante-medecine.journaldesfemmes.com/faq/21786-oxyde-de-zinc-definition>

- [16] RWG. Wyckoff, Crystal Structures, volume 1, Inter Science Publishers, INC. New York (1960).
- [17] HL. Hartnagel., AL. Dawar., AK. Jain ., C. Jagadish, Semiconducting Transparent Thin Films. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, (1995).
- [18]<http://www.memoireonline.com/11/10/4089/Etude-du-dopage-des-couches-minces-de-ZnO-elaborees-par-spray-ultrasonique10.png>.
- [19] OXYDE DE ZINC, fiche de sécurité du Programme International sur la Sécurité des Substances Chimiques.
- [20] INERIS - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, Version N°2-2mars 2005.
- [21] JF. Capitant. La Carboxymethylcellulose de sodium. Société Pronoval (NOVACFX & Cie) Paris. Brochure technique
- [22] C.Baker., Methylcellulose & Sodium Carboxymethylcellulose. The book and paper group annual (1982). Uses in Paper Conservation, 1.
- [23] DE. Dunstan.,EK.Hill et Y.Wei., Direct measurement of polymer segment orientation and distortion in shear: semi-dilute solution behavior, *Polymer* 45, 1261- 1266. (2004).
- [24] Xiao Hong Yang et Wei Ling Zhu., Viscosity properties of sodium carboxymethylcellulose Solutions, *Cellulose* 14:409–417. (2007).
- [25] SL. Young.,CF. Shoemaker., Measurement of shear-dependent intrinsic viscosities of carboxymethylcellulose and xanthan gum suspensions, *C. J ApplPolymSci* (1991), 42, 2405.
- [26] M.Moan., C.Wolff., On the intrinsic viscosity and the non-newtonian behavior of dilute solutions of carboxymethylcellulose in pure water, *Eur. Polym. J* (1973),,9 1085-1093.
- [27] C.Barba., D.Montané., M.Rinaudo et X.Farriol., *Synthesis and characterization of carboxymethylcelluloses (CMC) from non-wood fibers I. Accessibility of cellulose fibers and CMC synthesis. Cellulose* 9, 319-327(2002).
- [28] MT.Ghannam., MN.Esmail., Rheological properties of carboxymethylcellulose. *J ApplPolymSci*64 :289. (1997).
- [29] Kaouther Ben Azouz. Relation entre propriétés rhéologiques et structure microscopique de dispersions de particules d'argile dans des dispersions de polymères : Rhéologie des solutions aqueuses de CMC. 188p. Thèse de Doctorat : Mécanique : Strasbourg, Université de Strasbourg (2010)

**Annexes**

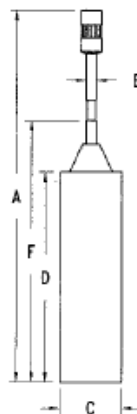
**Annexe 1 : Dimensions des mobiles (spindles) du viscosimètre en mm**

Spindle	A	B	C- Diametre	D	E	F
Sp 62	115	3.2	18.72	6.86	25.4	50.0
Sp 63	115	3.2	12.6	1.78	25.6	50.0

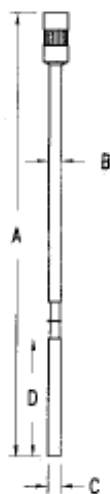


Caractéristiques géométriques des mobiles Sp 62 et Sp 63

Spindle	A	B	C-diamètre	D	F
Sp 61	115	3.2	18.84	65.1	80.97
Sp 64	115	3.2	3.2	31.01	N/A



Caractéristique géométriques du mobile Sp 61



Caractéristique géométriques du mobile Sp 64

**Annexe 2** : Produits utilisés

- **Oxyde de zinc (ZnO)**

Fabricant : Riedel-de Haen

M=81.38g/mol

Pureté=99%min

- **Carboxymethyle cellulose de sodium (CMC Na)**

Fabricant: Aldrich Chemical Company

M=250000 g/mol

- **Laurylsulfate de sodium**

Fabricant: Merck

Formule:  $C_{12}H_{25}SO_4Na$

Pureté 99% min.

**Annexe 3 : Dispositifs utilisé**

➤ **Dispositif de préparation**



**Agitateur mécanique de marque Heidolph**



**Homogénéiseur IKA T10**

➤ Dispositif de mesure



**Viscosimètre Brookfield DV-I +**