

République Algérienne Démocratique 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 solution  
de carboxyméthylcellulose**

**Ibtissem SAIDANI**

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, Pr ENP**

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

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

**ENP 2017**



République Algérienne Démocratique 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 solution  
de carboxyméthylcellulose**

**Ibtissem SAIDANI**

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, Pr ENP**

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

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

**ENP 2017**

## Dédicace

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents qui m'ont soutenu tout au long de ma vie*

*A mes sœurs et mon frère, les mots ne peuvent résumer ma reconnaissance et mon amour à ses égards*

*A mon oncle que j'aime tant*

*A mes grands-parents que dieu les protègent et les gardent pour nous*

*A toute la famille et à tous ce que j'aime*

*A mes adorables amies, pour leur fidélité*

*A tous mes amis avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur*

*Que toute personne m'ayant aidé de près ou de loin, trouve ici l'expression de ma reconnaissance*

*Ibtissem*

## *Remerciements*

*En préambule je tiens à remercier ALLAH qui m'aide et donne la patience et le courage durant ces années d'étude*

*Je tiens à remercier tout d'abord mon encadreur, professeur TOUDERT AHMED ZAID, en exprimant ma profonde gratitude, pour sa patience et surtout sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.*

*Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes les remarques et critiques, ainsi que le personnel et les enseignants qui ont contribué à ma formation.*

## المخلص

هذه الدراسة موجهة إلى دراسة السلوك الريولوجي لمحلول مائي من الكاربوكسيميثيل سيليلوز الصوديوم حيث نقيس اللزوجة ثم نقوم بحساب سرعة ومعدل القص ثم نقوم بالرسم البياني بهدف تحديد السلوك الريولوجي للمحلول موضوع الدراسة.

## الكلمات الدالة

الريولوجيا، معدل القص، سرعة القص، سلوك ريولوجي.

## ABSTRACT

Our master's work is oriented towards the study of the rheological behavior of an aqueous solution of sodium carboxymethylcellulose.

We measure the viscosity using a viscometer and then calculate the fundamental quantities of the rheology: rate and shear rate then plot the rheogram of the solution and finally model the behavior of the solution.

## Key Words

Rheology, shear stress, shear rate, rheological behavior.

## Résumé

Notre master est orienté vers l'étude du comportement rhéologique d'une solution aqueuse de carboxyméthylcellulose de sodium.

Nous avons mesuré la viscosité à l'aide d'un viscosimètre puis calculer les grandeurs fondamentales de la rhéologie : taux et vitesse de cisaillement puis tracer le rhéogramme de la solution et en fin modéliser le comportement de la solution.

## Mots clés

Rhéologie, contrainte de cisaillement, vitesse de cisaillement, comportement rhéologique.

## Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Partie bibliographique

Introduction .....	8
<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, contraintes de cisaillement .....	11
I.2.1 Contrainte de cisaillement .....	11
I.2.2 Déformation et vitesse de cisaillement .....	12
I.3 Equation rhéologique d'état et rhéogrammes.....	14
I.3.1 Equation rhéologique d'état .....	14
I.3.2 Rhéogrammes .....	14
I.4 Viscosités .....	14
I.4.1 Viscosité dynamique (apparente) .....	14
I.4.2 Viscosité cinématique .....	15
I.4.3 Viscosité relative, spécifique, intrinsèque .....	15
<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>
III.1 Principe de fonctionnement.....	26
III.2 Variables liées au viscosimètre.....	26
III.3 Mesures de la viscosité du fluide .....	26
III.4 Mesures du taux de cisaillement.....	27
<b>IV Chapitre 4 : Etude rhéologique des solutions CMC(Na).....</b>	<b>29</b>
IV.1 Définition .....	29
IV.2 Obtention.....	29

IV.3 Structure chimique, Na-CMC.....	30
IV.4 Propriétés typiques de la CMC(Na) .....	31
IV.5 Applications .....	31
IV.6 Rhéologie des solutions de CMC(Na) .....	32

## **Partie expérimentale**

<b>Introduction .....</b>	<b>34</b>
<b>I Mode opératoire .....</b>	<b>34</b>
I.1 Préparation de la solution .....	34
I.2 Mesure de viscosité .....	34
<b>II Résultats obtenus .....</b>	<b>34</b>
<b>III Modélisation du comportement.....</b>	<b>36</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>37</b>
<b>Références .....</b>	<b>38</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>40</b>

### Liste des tableaux

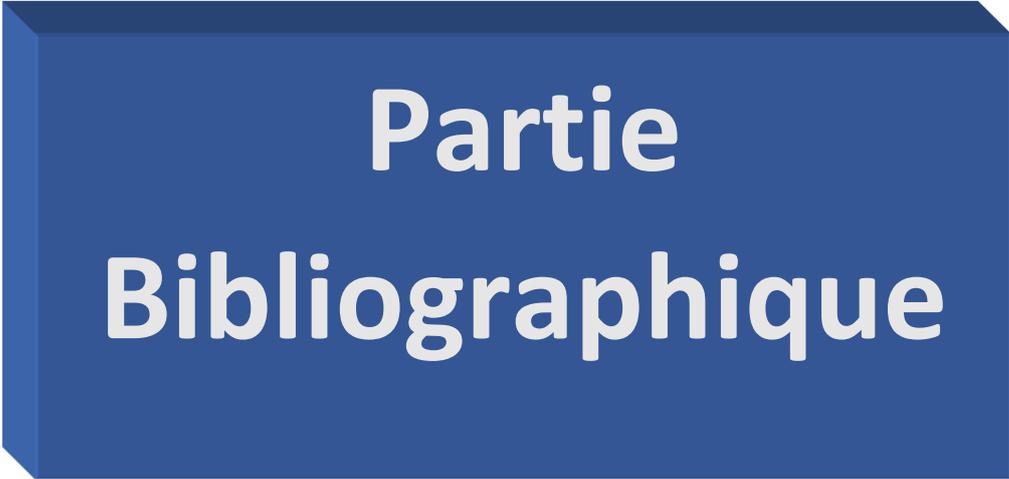
Tableau 1: Propriétés de la carboxyméthylcellulose de sodium [22] .....	31
Tableau 2: Résultats de l'analyse rhéologique .....	34

### Liste des figures

Figure 1: forces agissant sur les deux éléments de couches voisines [3] .....	11
Figure 2: Schéma de l'écoulement de cisaillement simple [3] .....	13
Figure 3: Schéma représentatif de l'angle entre la tangente et le vecteur de déplacement [3] .....	13
Figure 4: Rhéogramme d'un fluide newtonien [4] .....	17
Figure 5: Rhéogramme d'un liquide rhéofluidifiant [4] .....	18
Figure 6: Rhéogramme d'un liquide rhéoépaississant [4] .....	19
Figure 7: Rhéogramme d'un liquide de Bingham [4] .....	20
Figure 8: Rhéogramme d'un liquide de Casson [4] .....	22
Figure 9: Boucle d'hystérésis de référence de gel fluidifiant [4] .....	23
Figure 10: Schéma représentatif d'une géométrie de deux cylindres coaxiaux [13] .....	27
Figure 11: Processus expérimental de la carboxyméthylation de sodium [19] .....	30
Figure 12: Structure de la carboxyméthylcellulose de sodium [18] .....	31
Figure 13: Fonction et propriétés de la CMC (Na) .....	32
Figure 14: Courbe de viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement .....	35
Figure 15: Rhéogramme de la solution de la CMC (Na) .....	35
Figure 16: Représentation log-log du rhéogramme de CMC (Na) .....	36

## Introduction

Les solutions de polymères sont l'objet de nombreuses études depuis maintenant plus d'un demi-siècle. Elles sont présentes dans la nature (salive, mucus...) et sont introduites dans de nombreuses préparations industrielles (cosmétiques, peintures...). Il est donc fondamental de comprendre comment s'écoulent ces fluides. Par ailleurs Les solutions de polymères de grandes masses molaires présentent des comportements très différents des liquides simples. Ces solutions sont non-newtoniennes même à de très faibles concentrations. Dans le présent travail nous allons étudier le comportement rhéologique d'une solution de carboxyméthylcellulose de sodium.



**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 des déformations et écoulements de la matière, des contraintes qui en résultent et des efforts qu'il faut appliquer pour les obtenir [1]. L'objet de la rhéologie est de déterminer les contraintes et les déformations en chaque point d'un milieu. [2]

Son domaine d'application couvre l'ensemble des fluides complexes, tels que les polymères, les suspensions colloïdales, les émulsions et les tensioactifs. Il est nécessaire de connaître le comportement de ces matières pour leur mise en œuvre.

### I.2 Mouvement laminaire de cisaillement, contraintes de cisaillement

Un mouvement laminaire de cisaillement est un mouvement au cours duquel le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes, d'épaisseurs infiniment minces ; la déformation du matériau s'effectue par un glissement relatif des différentes couches les unes sur les autres, sans qu'il y ait de transfert de matière d'une couche à l'autre ; c'est un mouvement strictement ordonné et stratifié qui se produit sans brassage du matériau et sans variation de son volume. [3]

#### I.2.1 Contrainte de cisaillement

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées de mouvement relatif les unes par rapport aux autres : Deux couches successives, au contact l'une de l'autre, se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il en résulte l'apparition de force de frottement qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche : ces forces tangentielles sont appelées forces de cisaillement.

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).

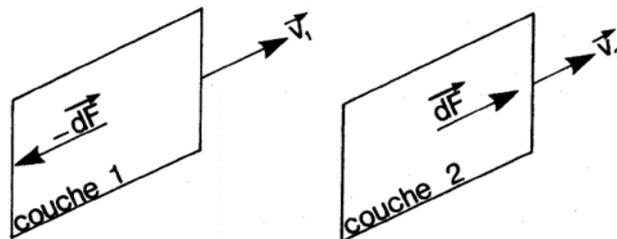


Figure 1: forces agissant sur les deux éléments de couches voisines [3]

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.

Il est commode de rapporter ces forces de cisaillement à l'unité de surface sur laquelle elles s'exercent ; on définit ainsi ce qu'on appelle la contrainte de cisaillement  $\tau$  :

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

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

Il est clair que la contrainte de cisaillement  $\tau$  est une fonction définie en tout point du matériau et variant en général d'une couche à l'autre (le plus souvent, par raison de symétrie,  $\tau$  demeure constant en tout point d'une même couche).

La contrainte de cisaillement  $\tau$  est la grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie. [3]

### 1.2.2 Déformation et vitesse de cisaillement

La déformation et la vitesse de cisaillement sont deux grandeurs cinématiques fondamentales qui décrivent le mouvement du matériau dans l'espace, au cours du temps, indépendamment des contraintes qui lui ont donné naissance. [3]

- **Déformation de cisaillement  $\varepsilon$**

Pour définir la déformation de cisaillement, il est souhaitable d'envisager le cas particulier d'un mouvement laminaire de cisaillement présentant la symétrie plane.

Considérons les particules de matières qui se trouvent au temps origine  $t=0$  dans une certaine section droite. A un instant  $t$  postérieur, chaque particule de matière aura parcouru la distance  $u(x,t)$  où  $x$ , distance séparant la particule de matière du plan solide inférieur, permet de repérer les différentes couches planes du matériau.

On définit la déformation de cisaillement dans le cas de la symétrie plane par la relation :

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

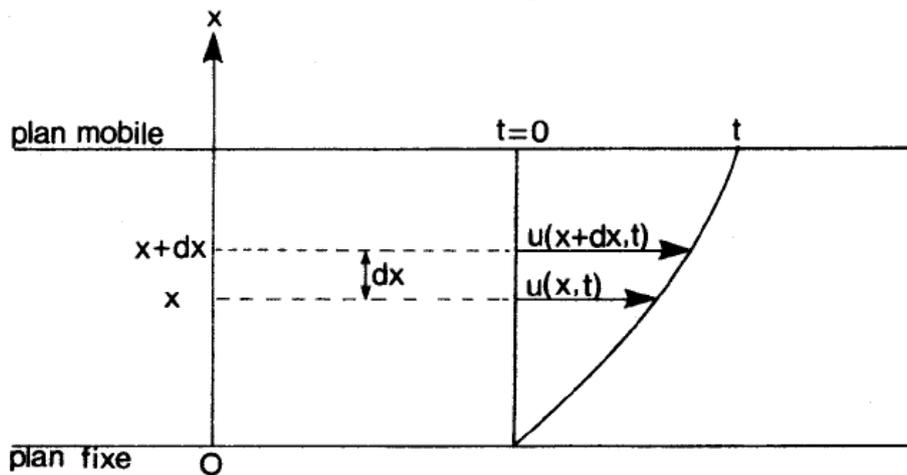


Figure 2: Schéma de l'écoulement de cisaillement simple [3]

On constate que cette grandeur 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 voisine : c'est en effet cette variation 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 :

$$\varepsilon(x,t) = tg\alpha(x,t)$$

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)

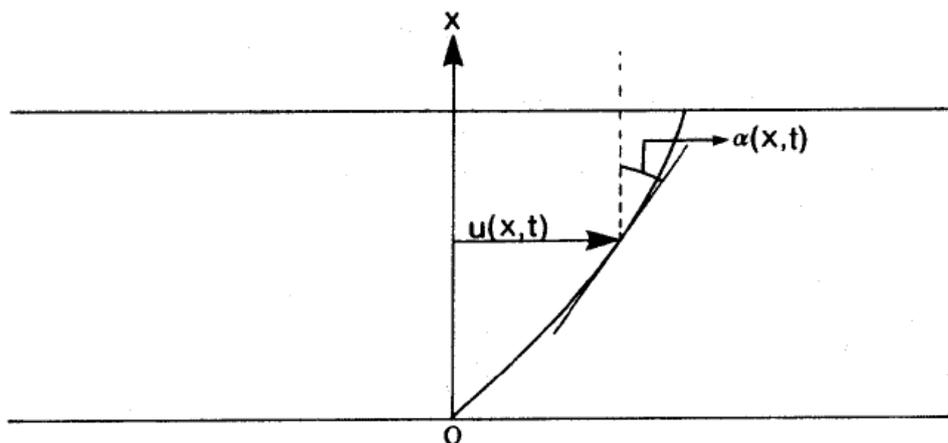


Figure 3: Schéma représentatif de l'angle entre la tangente et le vecteur de déplacement [3]

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]

- **Vitesse de cisaillement  $\dot{\varepsilon}$**

Par définition, la vitesse de cisaillement  $\dot{\varepsilon}$  est la dérivée par rapport au temps de déformation de cisaillement  $\varepsilon$  ; C'est une vitesse de déformation:

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

### I.3 Equation rhéologique d'état et rhéogrammes

#### I.3.1 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.3.2 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 pressions 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 constante.
- 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.4 Viscosités

#### I.4.1 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 :

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

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

### I.4.2 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.4.3 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.

---

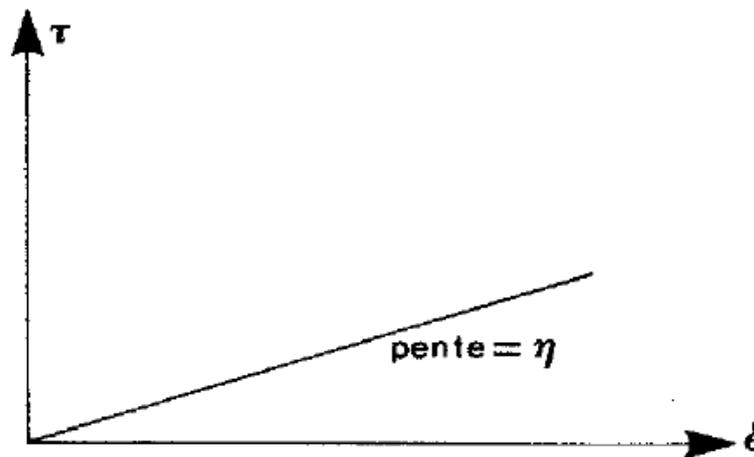
*Chapitre 2*  
*Typologie des*  
*écoulements*

---

## 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 :  $\tau = \eta \dot{\epsilon}$ .



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

Ce comportement à l'écoulement est le plus simple. Dans ce cas, la viscosité dynamique est indépendante de la vitesse de cisaillement. [4]

### II.2 Le comportement non-newtonien

Une grande majorité des liquides ne présente 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. [4]

Les fluides non-newtoniens sont classés selon leur dépendance du temps d'application de la contrainte en deux 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

Un liquide rhéofluidifiant voit sa viscosité diminuer lorsque le taux de cisaillement augmente. C'est le cas de la grande majorité des liquides complexes : sang, shampooing, jus de fruit concentré, encre d'imprimerie, yaourt, suspension de particules solides, etc.

Dans les suspensions la diminution de la viscosité provient de la destruction des structures de particules solides qui se sont formées (comme dans les peintures), et également de l'orientation de ces particules dans le sens de l'écoulement. [4]

L'allure de la couche d'écoulement d'un liquide rhéofluidifiant est donnée sur la figure 5

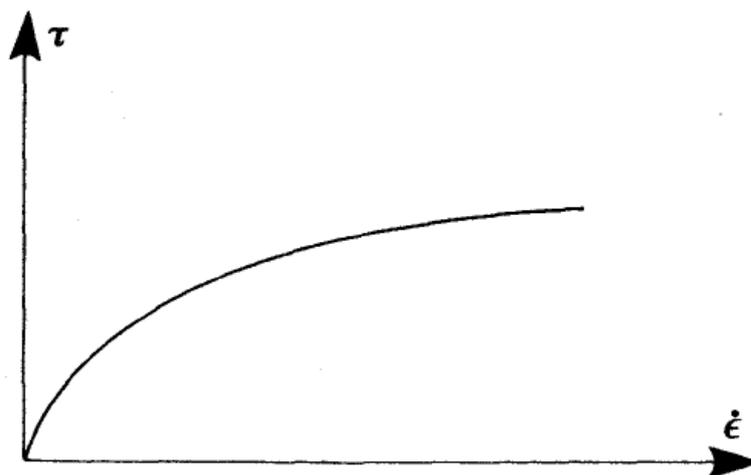


Figure 5: Rhéogramme d'un liquide rhéofluidifiant [4]

#### b) Les liquides rhéoépaississants

Un liquide rhéoépaississant voit sa viscosité augmenter avec le taux de cisaillement. Dans la vie quotidienne, le rhéoépaississement est beaucoup plus rarement observé que la rhéofluidification. La présence de rhéoépaississement est observée dans des suspensions de particules micrométriques d'argile, de craie, de quartz, ou de cellules du sang dans du plasma. Le rhéoépaississement est également observé pour certaines solutions de polymères ou de tensioactifs.

Notons qu'un liquide peut être rhéoépaississant pour une certaine gamme de cisaillement et rhéofluidifiant voire newtonien pour d'autre gamme. [5]

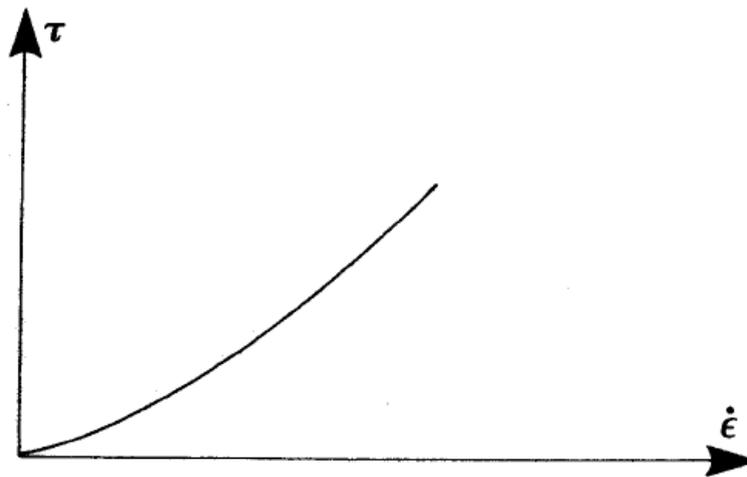


Figure 6: Rhéogramme d'un liquide rhéoépaississant [4]

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 :

❖ 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][7] tient compte des limites du comportement rhéologique. Aux faibles contraintes de cisaillement, on observe généralement un comportement Newtonien, avec un plateau de viscosité appelé 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

#### Liquide plastique

Il s'agit de liquide qui ne s'écoule qu'à partir d'une certaine valeur de la contrainte, notée  $\tau_c$  appelée seuil d'écoulement, et qui représente l'ordonnée à l'origine des rhéogrammes (figure 7 et 8).

L'interprétation la plus communément admise d'un tel comportement revient à supposer que le matériau considéré possède au repos, une structure tridimensionnelle rigide représentée par exemple par un ensemble de particules emboîtées les unes dans les autres, ou floculées. Le seuil d'écoulement correspond à la force nécessaire pour les séparer, vaincre les forces de cohésion du type Van Der Waals, et provoquer l'écoulement. Au-delà de ce seuil, la structure rigide est détruite et l'écoulement s'effectue sous l'effet de la contrainte effective  $\tau - \tau_c$ . [4]

On distingue deux types de liquides plastiques :

#### a) Les 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 :

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

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

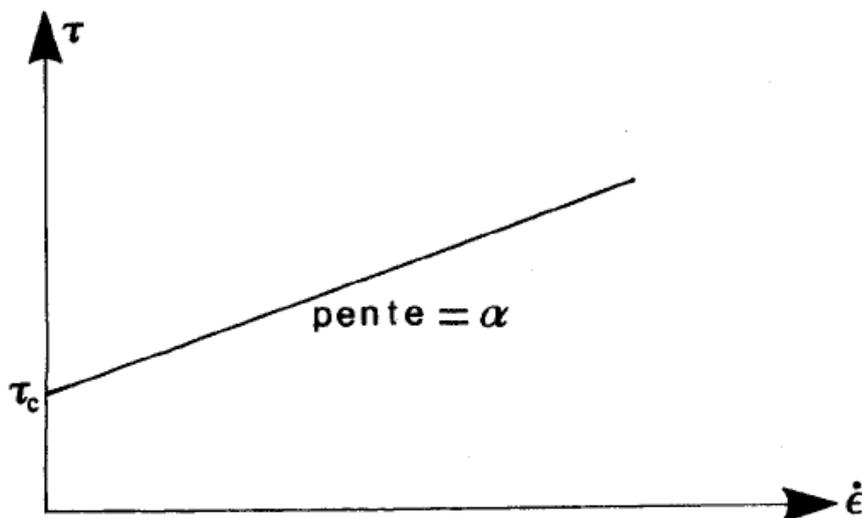


Figure 7: Rhéogramme d'un liquide de Bingham [4]

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. [4]

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

### b) Les 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, les matières grasses, les suspensions de sulfate de zinc ou de Baryum. Pour décrire quantitativement un tel comportement, on utilise essentiellement deux équations :

❖ Equation de Casson :

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

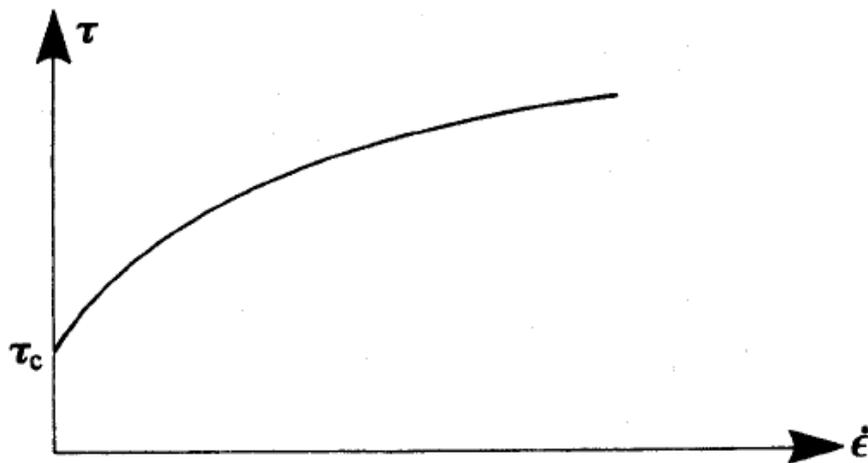
Où  $\beta$  est une constante appelée également viscosité plastique

❖ Equation de Herschel-Bulkley

Elle est de type lois de puissance avec seuil d'écoulement [4]:

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

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 [4]

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

Au cours du cisaillement, la structure interne du liquide et par conséquent sa viscosité peut évoluer.

#### a) Liquides thixotropes

Les liquides thixotropes voient leur viscosité diminuer avec le temps lorsqu'ils sont soumis à un cisaillement constant ou à une contrainte constante. A l'arrêt du cisaillement, la viscosité augmente avec le temps, ce qui indique une réversibilité (au moins partielle) du phénomène. Des gels de suspension aqueuse d'oxyde de fer présente ainsi la propriété remarquable de devenir complètement liquide par une simple secousse, à tel point que la texture du gel liquéfié n'est plus comparable à celle de la suspension d'origine. Cette définition s'applique bien aux matériaux rhéofluidifiants, lorsque ce caractère est réversible. C'est une propriété très générale des dispersions concentrées.

De très nombreux liquides sont thixotropes : peintures, encres, suspensions d'argile, produits alimentaires (yaourt, sauce tomate concentrée par exemple), sang, solutions concentrées de polymères, etc. Une interprétation est que la thixotropie reflète la destruction progressive, en fonction du temps et sous cisaillement, d'une microstructure interne du liquide. [9]

Le mode expérimental adopté pour tracer des courbes d'écoulements revêt une grande importance. Quand on effectue la détermination point par point d'un rhéogramme, on peut envisager trois procédés différents :

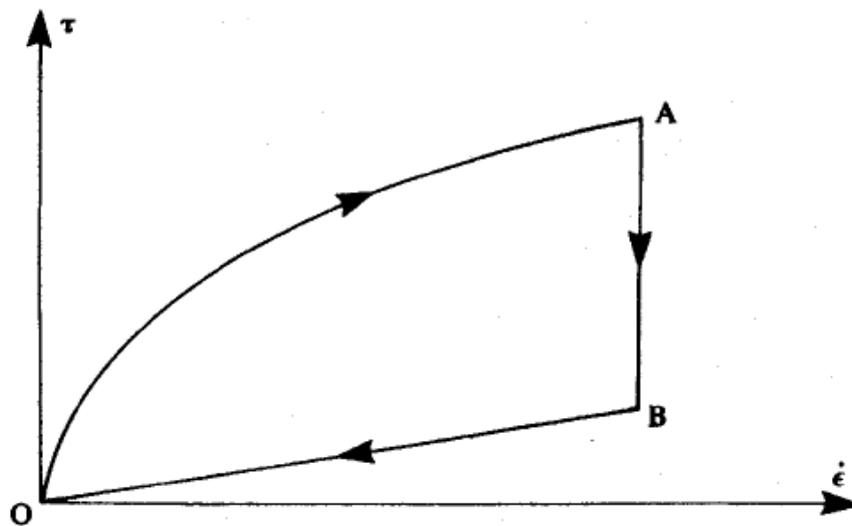
- Faire des mesures  $\tau$  et  $\dot{\epsilon}$  dans une chronologie quelconque ;
- Procéder par valeurs croissantes de  $\tau$  ou  $\dot{\epsilon}$ ;
- Procéder par valeurs décroissantes de  $\tau$  ou  $\dot{\epsilon}$ .

Le premier n'est pas utilisé car il est difficilement reproductible et fournit des courbes peu interprétables dans le cas précis de phénomènes dépendant du temps. Par contre, les deux autres le sont et ne sont pas toujours comparables.

Les rhéogrammes obtenus jusque-là étaient univoques, c'est-à-dire qu'on obtient toujours la même courbe quel que soit le temps mis pour atteindre les différentes contraintes ou vitesses de déformation de la mesure. On dit que ces corps ne présentent pas d'hystérésis.

En particulier, on peut très bien établir ces courbes par valeurs croissantes ou décroissantes de  $\tau$  ou  $\dot{\epsilon}$  et quelle que soit la durée de l'expérience. Il n'en n'est pas de même de tous les corps : certains présentent une hystérésis et les mesures dépendent de la manière dont on fait croître ou décroître la contrainte. Si on voulait caractériser graphiquement et complètement ces corps, il faudrait tracer des rhéogrammes à trois dimensions en ajoutant une variable temporelle. On ne le fait que rarement.

On se contente le plus souvent d'une information partielle en procédant de la façon suivante : on effectue une expérience de charge (cisaillement croissant) suivie d'une décharge (cisaillement décroissant), et on trace dans un même système d'axe les deux rhéogrammes correspondants de la manière habituelle. On obtient deux courbes : la courbe de retour ne coïncidant pas avec la courbe à l'aller. On dit qu'on a tracé une boucle d'hystérésis.



**Figure 9:** Boucle d'hystérésis de référence de gel fluidifiant [4]

La partie OA de la courbe est caractéristique du comportement fluidifiant.

Sous cisaillement maximal, la viscosité apparente diminue progressivement, ce qui correspond à un changement de structure. C'est la transformation de l'état de gel à l'état fluide. En B la structure étant complètement détruite, on garde une viscosité constante pendant toute la décharge, d'où le retour linéaire. [4]

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

Pour une contrainte donnée, la viscosité apparente s'accroît avec le temps et diminue après suppression du cisaillement, jusqu'à atteindre sa valeur initiale.

Il s'agit d'un épaissement de la préparation en fonction de la durée de cisaillement. Le gel d'hydroxyde de magnésium présente un tel comportement. **[10]**

Ces solutions sont rares.

### c) Liquides viscoélastiques

Le caractère viscoélastique est un comportement non-Newtonien très important et très fréquent dans les solutions de polymères. 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. **[11]**

---

*Chapitre 3*  
*rhéométrie et*  
*dispositifs*  
*expérimentaux*

---

### III Chapitre 3 : rhéométrie et dispositifs expérimentaux

Dans la présente étude, nous avons travaillé avec un rhéomètre rotatif, à contrainte imposée, équipé 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 centi Poise ou milliPascal \*secondes) est déterminée par la vitesse de rotation du mobile, la taille et la forme du mobile, le conteneur dans lequel il tourne et le couple à pleine échelle du ressort calibré. [12]

#### 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 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 mobile (*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. [12]

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

Pour un élément donné, on fait varier les vitesses de rotation RPM 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 :

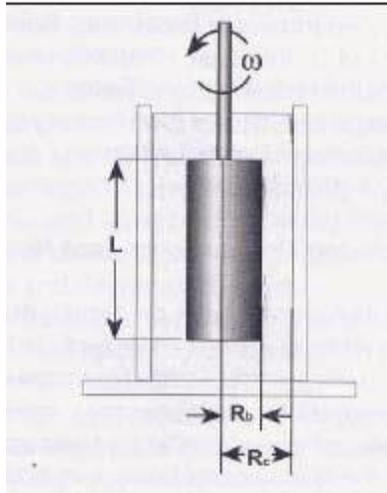
$$\dot{\epsilon} = \frac{2R_b^2 \cdot \omega}{(R_c^2 - R_b^2)} \quad [13] \quad (14)$$

Avec :

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

$R_c$  : rayon du contenant.

$R_b$  : rayon de l'élément choisi.



**Figure 10:** Schéma représentatif d'une géométrie de deux cylindres coaxiaux [13]

### III.4 Mesures du taux de cisaillement

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

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L} \quad [13] \quad (15)$$

$M$  : moment de cisaillement.  $M = \tau \cdot 2\pi R_b^2 L$ .

$L$  : hauteur de l'élément.

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

---

*Chapitre 4*  
*Etude rhéologique des*  
*solutions CMC(Na)*

---

## IV Chapitre 4 : Etude rhéologique des solutions CMC(Na)

### IV.1 Définition

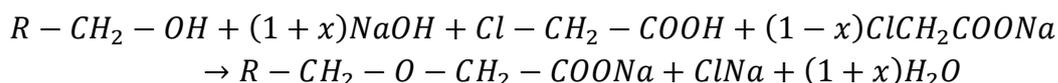
La Carboxyméthylcellulose de sodium (Na CMC) est le nom générique d'une série d'éthers cellulosiques obtenus par réaction de celluloses présentant des caractéristiques définies et de monochloracétate de sodium ou d'acide monochloracétique. [14]

La CMC purifiée est une substance granulaire blanche grisâtre, présentée en poudre non-toxique, inodore, biodégradable. Elle ne favorise pas de réactions allergiques chez l'homme. [15]

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 la possibilité d'obtenir une viscosité élevée à basses concentrations, sa capacité à agir en tant qu'épaississant et en tant qu'agent tensio-actif [16] [17].

### IV.2 Obtention

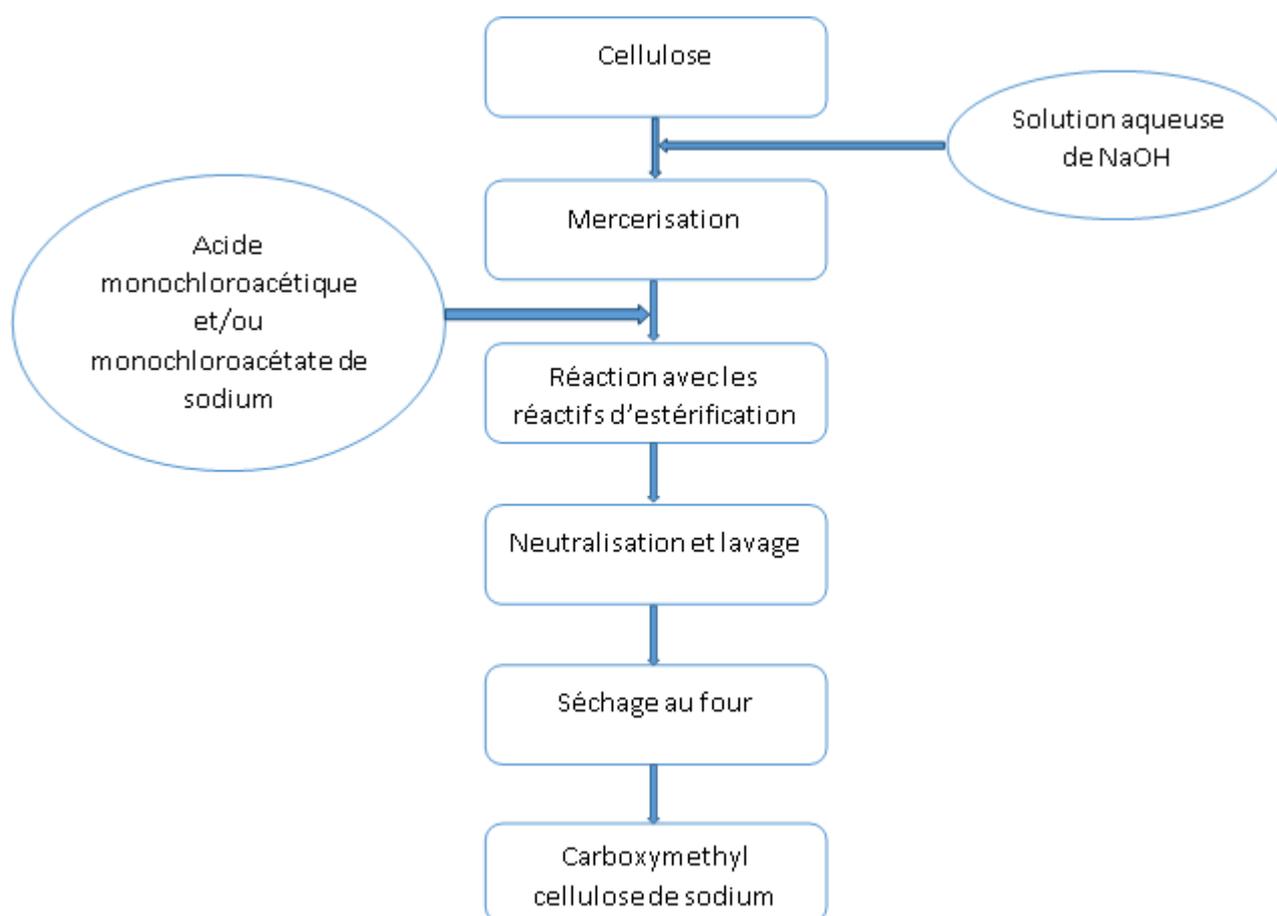
La Carboxyméthylcellulose de sodium est généralement obtenue par réaction de cellulose pure et d'acide monochloracétique et/ou de monochloracétate de sodium en présence de soude caustique, la soude ayant pour double rôle d'une part de rendre la cellulose réactive par formation d'alcali cellulose, d'autre part de neutraliser le Chlorure d'hydrogène formé.



$$0 \leq x \leq 1 \quad R = C_5H_7O_4$$

La conversion de la cellulose en dérivés s'effectue par modification chimique simple. Il est bien connu que la solubilité des dérivés de la cellulose dépend fortement non seulement du degré de substitution ( $D_s$ ) mais également de la distribution des substituants dans les unités de glucose et le long de la chaîne de cellulose. [14]

Kötz et al [18] ont étudié la caractérisation des échantillons de CMC synthétisée du point de vue des données macromoléculaires et électrochimiques. Les procédures expérimentales de la carboxyméthylation de sodium sont représentées dans la figure 11 :



**Figure 11:** Processus expérimental de la carboxyméthylation de sodium [19]

### IV.3 Structure chimique, Na-CMC

La CMC a une structure constituée d'un enchaînement de glucoses comme le montre la figure 12. La présence sur chaque monomère glucose de trois groupements hydroxyle, liée aux carbones C2, C3 et C6, permet la formation de ponts hydrogène entre les structures cellulosiques. Cette interaction entre les chaînes linéaires de cellulose est à l'origine de l'insolubilité de ce polymère naturel dans de nombreux solvants. Cette structure est renforcée par la rigidité du squelette et peut conduire à la formation de zones cristallines dans la cellulose. Le taux de cristallinité varie suivant l'origine de la cellulose. [20][21]

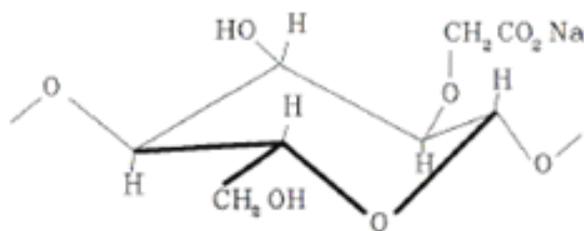


Figure 12: Structure de la carboxyméthylcellulose de sodium [18]

### IV.4 Propriétés typiques de la CMC(Na)

Tableau 1: Propriétés de la carboxyméthylcellulose de sodium [22]

Propriétés	spécifications
Densité	0.75 (g/cm <sup>3</sup> )
Point de fusion	227-252 (°C)
Teneur en eau	<10%
pH (solution aqueuse de 1% en masse)	6-8
pKa	4.3

### IV.5 Applications

La CMC est très utilisée dans l'industrie, y compris dans l'industrie textile, (comme produit d'encollage) dans les émulsions de résine de peinture et les encres d'imprimeries. Dans le domaine pétrolier en raison de son fort pouvoir de rétention de l'eau, elle est employée dans les boues de forage pour augmenter leur stabilité et éviter le gonflement des couches argileuses. Dans le domaine des matériaux de construction, la CMC est utilisée comme stabilisant et agent hydrophile dans les compositions de ciment. C'est un additif dans les colles et les adhésifs. Dans l'industrie du papier, la CMC renforce et augmente la rétention de l'eau des mélanges d'enduit. Elle est choisie de préférence du fait de ses fortes propriétés épaississantes et stabilisantes. La CMC est également rencontrée dans les détergents, les savons, les épaississants et d'autres produits de beauté dans le domaine du cosmétique. En agriculture la CMC joue le rôle d'agent de suspension dans les pesticides à base d'eau, aussi pour faciliter la dégradation de certains engrais hautement polluants. Dans l'industrie alimentaire, on l'utilise comme épaississant ou comme stabilisateur d'émulsion de certains produits laitiers, les préparations sèches pour boissons, le glaçage, les sirops et les aliments cuits au four. Des catégories de grande pureté de CMC sont utilisées comme additifs. La CMC fonctionne comme agent pour prolonger la période d'expiration des produits alimentaires. La CMC est également employée dans les applications pharmaceutiques comme formateur de gels, stabilisant pour suspensions, émulsions, sprays et bioadhésifs, en médecine pour la formation de gels pour la chirurgie cardiaque, thoracique et de la cornée, en céramiques et d'autres utilisations biologiques qui nécessitent des propriétés viscosifiantes. [23]

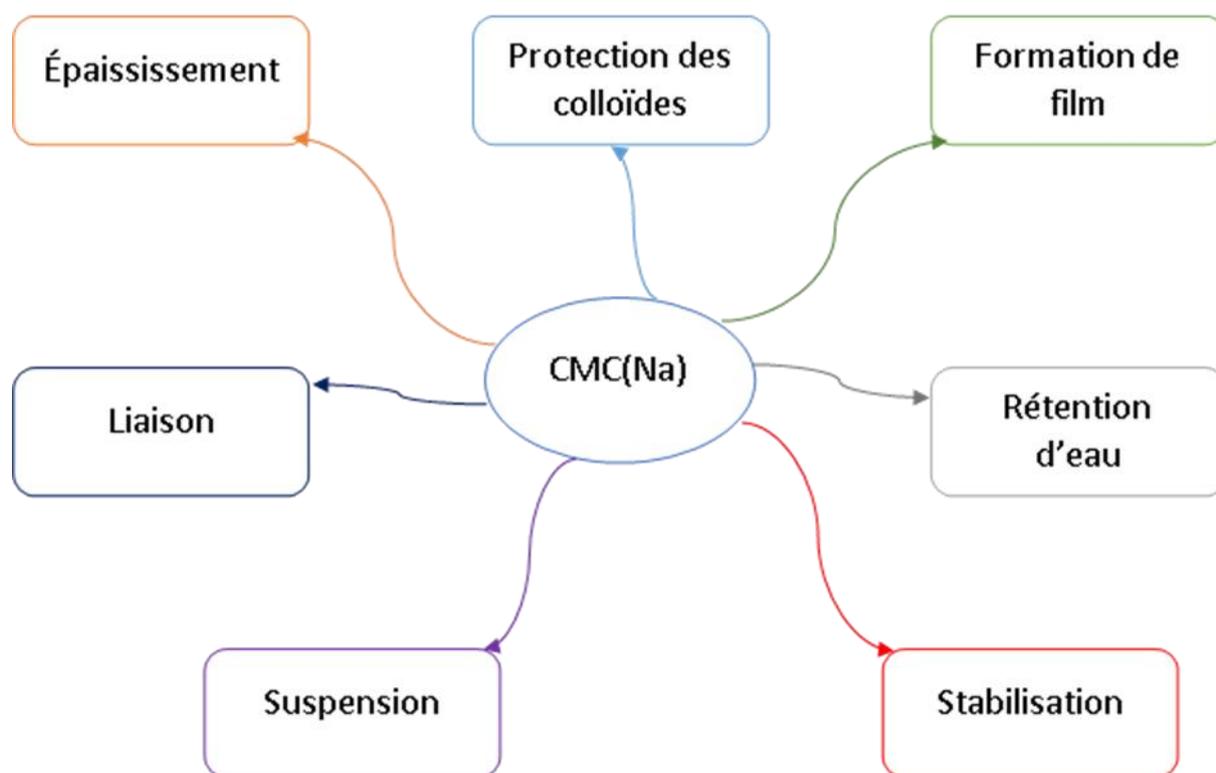


Figure 13: Fonction et propriétés de la CMC (Na)

### IV.6 Rhéologie des solutions de CMC(Na)

De nombreux travaux traitent des propriétés rhéologiques des solutions aqueuses de CMC(Na). [24, 25]. 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. [26]

Ghannam et Esmail et al. [27] 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 [19] 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  
expérimentale

## Introduction

Nous nous proposons, dans cette partie, d'étudier le comportement rhéologique d'une solution aqueuse de carboxyméthylcellulose de sodium (2.5%) en utilisant un rhéomètre Brookfield DV-I + avec le mobile Sp62

## I Mode opératoire

### I.1 Préparation de la solution

Dans un bécher on met 100 mL d'eau distillée et sous agitation avec un agitateur mécanique de marque Heidolph (annexe 2) à la vitesse de 480 tr/min ; on ajoute par petites quantités 2,5 g de CMC(Na) de masse molaire 250000 g/mol (Aldrich Chemical company). Pour assurer une bonne dissolution, on laisse la solution sous agitation pendant 30 min.

### I.2 Mesure de viscosité

La mesure est réalisée à l'aide du viscosimètre Brookfield DV-I + décrit au chapitre 3.

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

Le tableau 2 ci-dessous donne 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	840	1,4	2,498959	0,018776
1	750	2,5	4,462427	0,037551
2	660	4,4	7,853871	0,075102
2.5	648	5,4	9,638842	0,093878
4	622,5	8,3	14,81526	0,150205
5	618	10,3	18,3852	0,187756
10	585	19,5	34,80693	0,375511
20	574,5	38,3	68,36438	0,751023
50	534,6	89,1	159,0409	1,877556
100	/	/	/	/

La courbe de viscosité obtenue en fonction de la vitesse de cisaillement et le rhéogramme  $\tau = f(\dot{\epsilon})$  sont représentées ci-dessous :

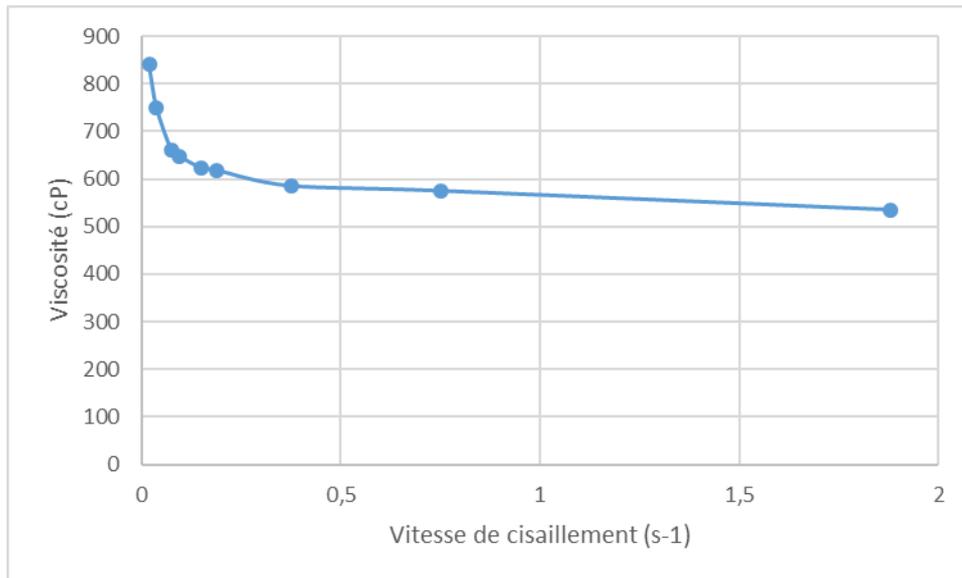


Figure 14: Courbe de viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement

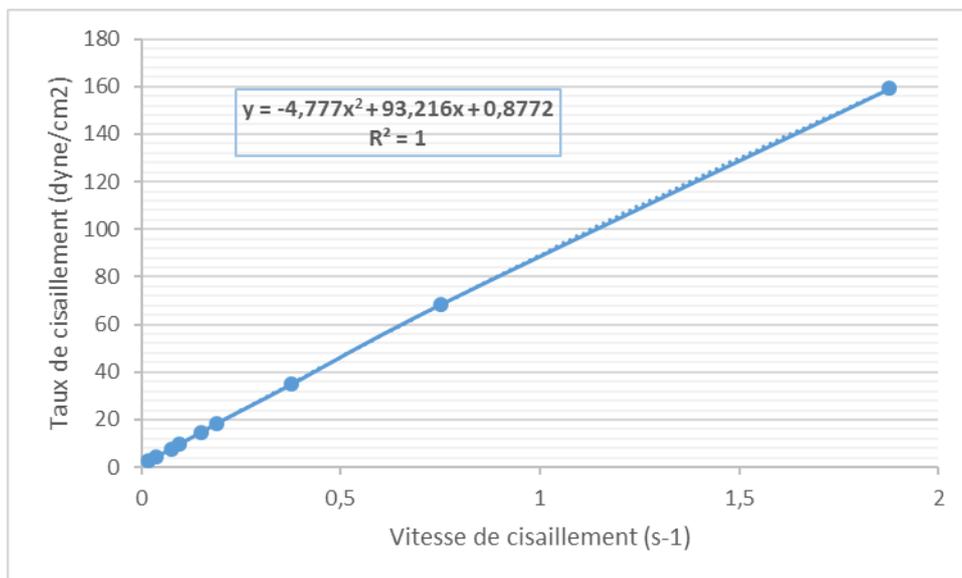


Figure 15: Rhéogramme de la solution de la CMC (Na)

### ✓ Interprétation

La figure 14 montre une diminution de la viscosité avec la vitesse de cisaillement ce qui indique que la solution a un comportement rhéofluidifiant. Ce comportement est confirmé par le rhéogramme (figure 15).

Cette diminution est expliquée par le fait que les molécules s'alignent progressivement au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement augmente ce qui favorise ainsi l'écoulement des différentes couches de liquide. Une autre explication peut être avancée : Une destruction de la structure du liquide par rupture des liaisons.

### III Modélisation du comportement

La figure 16 montre la représentation log-log du rhéogramme de la solution de CMC(Na).

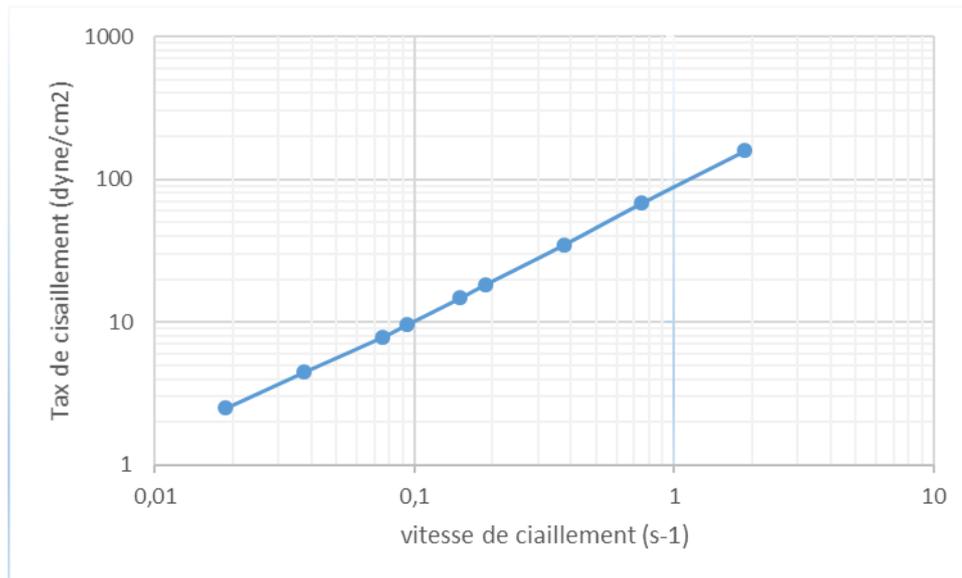


Figure 16: Représentation log-log du rhéogramme de CMC (Na)

D'après les figures 14 et 15 la solution de CMC(Na) a un comportement rhéofluidifiant qui peut être modélisé selon la figure 16 par une loi de puissance

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

De paramètres :

**n= 0,94 ;**

Et **k=87,75.**

La valeur de n est comprise entre 0 et 1 et donc elle confirme le comportement rhéofluidifiant de la solution étudiée.

## **Conclusion**

Dans cette étude nous avons évalué les caractéristiques rhéologiques d'une solution de CMC(Na) afin de déterminer le comportement rhéologique de cette solution.

La mesure de la viscosité ainsi que la détermination du taux et de la vitesse de cisaillement mettent en évidence un comportement rhéofluidifiant qui a pu être modélisé à l'aide du modèle de puissance.

## Références

- [1] Dictionnaire de rhéologie, (1990), Groupe français de rhéologie.
- [2] Persoz.B.« La rhéologie », Monographie Masson et Cie (1969).
- [3] G. Couarraze., JL. Grossiord. Chapitre 1 : généralités. In : *initiation à la rhéologie*. Edition. Paris : TEC & DOC (2000), p 3-11. ISBN :2-7430-0285-9.
- [4] G.Couarraze., J.L.Grossiord. Chapitre 3 : 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.
- [5] RG.Larson. The structure and rheology of complex fluids. Oxford university press, New York, (1999).
- [6] HA.Barnes., JF.Hutton et K.Walters., An introduction to rheology. Amesterdam: Elsevier Science Publishers, (1989).
- [7]RB.Bird., RC.Armstrong et O.Hassager., Dynamics of Polymeric Liquids .New York: Wiley, (1987).
- [8] MM.Cross., Rheology of Non-Newtonian Fluids (1965). A new flow equation for pseudo-plastic systems", *Journal of Colloid Sciences*, 20: 417-437.
- [9] HA.Barnes. Tixotropy- a review, *J.Non-Newtonian fluid*. (1997). Mech., 70, 1-33.
- [10] R.Delobel, Mesure des caractéristiques rhéologiques des polymères thermoplastiques, Publication du Centre de Recherche et d'Etude sur les Procédures d'Ignifugation des Matériaux (CREPIM) (1990).
- [11] K.Bekkour et N.Kherfella ., Linear viscoelastic behavior of bentonite water suspensions (2002).*AppliedRheology*. 12, 234-240.
- [12] Manuel d'utilisation du rhéomètre Brookfield DV-I +: Brookfield engineering laboratories, Inc. USA.MA 02346-1031
- [13] Manuel d'utilisation du rhéomètre Brookfield DV-I +: More solutions to sticky problems ( A guide to getting more from your Brookfield viscometer).
- [14] JF. Capitant. *La Carboxymethylcellulose de sodium*. Société Pronoval (NOVACFX & Cie) Paris. Source: <http://www.spq.pt/magazines/RPQ/258/article/532/pdf>
- [15] C.Baker., *Methylcellulose & Sodium Carboxymethylcellulose: Uses in Paper Conservation*. The book and paper group annual, vol1 (1982), accessible en ligne: <<http://cool.conservation-us.org/coolaic/sg/bpg/annual/v01/bp01-04.html>>
- [16] 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).

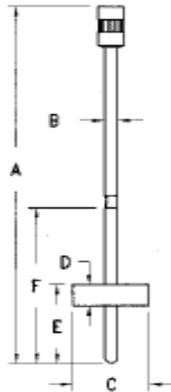
- [17] Xiao Hong Yang et Wei Ling Zhu., Viscosity properties of sodium carboxymethylcellulose Solutions, *Cellulose* 14:409–417. (2007).
- [18] J. Kôtz et al., (2001), Peculiarities in the physico-chemical behavior of nonstatistically substituted carboxymethylcelluloses. *Colloids Surf. A: Physicochem. Engng. Aspects* 183–185, pp. 621–633.
- [19] 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).
- [20] B. Feret., Interactions dans les systèmes montmorillonite/Carboxymethylcellulose : application aux fluides de forage. Thèse de doctorat : Paris, Université Pierre et Marie Curie (1992).
- [21] A. Benchabane., Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles –polymères. Effets de l'ajout de polymères. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg (2006).
- [22] Ainley Wade and Paul J Weller, Handbook of pharmaceutical excipients, 2<sup>nd</sup> Ed. (1994)
- [23] disponible sur : < <http://www.sercalia.com/fr/cmc-carboxy-methyl-cellulose>>
- [24] S.L. Young., C.F. Shoemaker., Measurement of shear-dependent intrinsic viscosities of carboxymethyl cellulose and xanthan gum suspensions, *C. J Appl Polym Sci* (1991), 42, 2405.
- [25] 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.
- [26] 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).
- [27] M.T.Ghannam ., M.N.Esmail., Rheological properties of carboxymethyl cellulose. *J Appl Polym Sci* 64 :289. (1997).

## Annexes

### Annexe 01

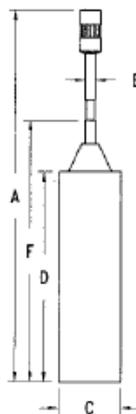
Dimensions des mobiles (spindles) du viscosimètre en mm

Spindle	A	B	C- Diamètre	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

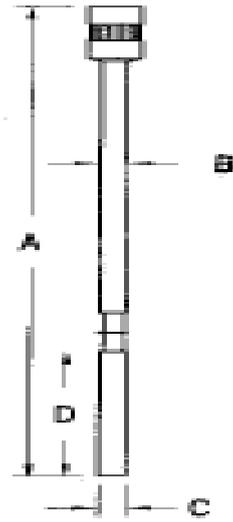


Caractéristiques des mobiles Sp 62 et Sp 63

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



Caractéristiques géométriques du mobile Sp 61



Caractéristiques du mobile Sp 64

**Annexe 2 : Dispositifs utilisés**

- Dispositifs de préparation



**Agitateur mécanique de marque Heidolph**

- Dispositif de mesure



**Viscosimètre Brookfield DV-I +**