

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

Ecole Nationale Polytechnique  
Département Hydraulique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**Mémoire de Magister**

Présenté par :

**M. BENGHANEM Abdelkader**  
Ingénieur en hydraulique de l'Ecole Nationale Polytechnique

Thème

**Etude Expérimentale du Comportement Rhéologique  
et Hydrodynamique des Matières en Suspension  
Application sur la vase des barrages**

JURY

<b>Pr. KETTAB A.</b>	<i>Professeur ENP</i>	<b>Président</b>
<b>M. BERKANI M.</b>	<i>Chargé de cours ENP</i>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mlle BENMAMAR S.</b>	<i>Chargée de cours ENP</i>	<b>Examinatrice</b>
<b>Pr. YAHI</b>	<i>Professeur Univ. TIZIOUZOU</i>	<b>Examineur</b>
<b>Dr. BILEK A.</b>	<i>Chargé de cours ENP</i>	<b>Examineur</b>

Année universitaire 2003/2004

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

*A ma mère, à mon père,  
A mes frères et sœurs et à toute ma famille,  
A ma fiancée CNF ... et à toute sa famille  
A tous mes amis*

*Je dédie ce modeste travail*

## **REMERCIEMENTS**

---

---

*Je tiens à remercier mon promoteur M. BERKANI, chargé de cours à l'ENP, de m'avoir proposé ce sujet, et de m'avoir guidé tous le long de la préparation de ce mémoire.*

*Je remercie également les membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je suis aussi très reconnaissant à M<sup>elle</sup> BENMAMAR pour son aide, et ses précieux conseils.*

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

*J'adresse mes vifs remerciements à M. HADJAJ Aoul, M. BENHADID directeur du Laboratoire de Rhéologie à l'USTHB, ainsi que M. MAHFOUD enseignant et chercheur dans ce Labo.*

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

---

---

## **ملخص :**

تهدف دراستنا التجريبية إلى استنتاج تغير سرعة سقوط الجزيئات العالقة في الماء بتغير تركيز هذه الجزيئات، وكذا علاقة التركيز مع التصرف الريولوجي. يمكن للنتائج المحصل عليها أن تساعد في تقدير انقصاص القص ودراسة ظاهرة الترسب.

## **الكلمات المفتاحية :**

سرعة السقوط ، الترسب ، التركيز ، اللزوجة ، الانقصاص ، التشوه.

## **RÉSUMÉ :**

*Notre étude vise à démontrer d'une manière expérimentale l'évolution de la vitesse de chute des matières en suspension en fonction de la concentration, ainsi que l'influence de cette dernière sur le comportement rhéologique.*

*Les résultats obtenus peuvent améliorer l'estimation de la contrainte de cisaillement et suivre ainsi le phénomène du tassement.*

## **MOTS CLEFS :**

*Vitesse de chute, Tassement, concentration, Viscosité, Contrainte, déformation.*

## **ABSTRACT :**

*Our study aims to demonstrate in an experimental manner the evolution of the speed of matter fall in abeyance according to the concentration, as well as the influence of this last on rheologic behavior.*

*The gotten results can improve the evaluation of the shearing constraint and can follow the phenomenon of jamming thus.*

## **KEY WORDS :**

*Speed of matter fall, jamming thus, concentration, Viscosity, constraint, Deformation*

**SOMMAIRE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
 Ecole Nationale Polytechnique

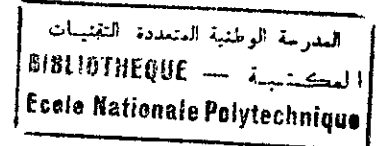
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Analyse de l'aspect théorique du mouvement du fluide</b> .....	4
I.1. Tenseur du taux de déformation .....	4
I.2. Tenseur de contraintes .....	6
I.3. Relation entre contrainte et déformation .....	7
I.3.1. Fluide Newtonien .....	9
I.3.2. Fluide plastique BINGHAM .....	10
I.3.3. Fluide plastique de Casson .....	10
I.3.4. Fluide pseudo- plastique .....	11
I.3.5. Fluide plastique complexe.....	11
<b>Chapitre II : Aspect théorique de la suspension.</b> .....	13
II.1. Interprétation du phénomène de la suspension .....	13
II.1.1. Tendance des particules à tomber.....	14
II.1.2. Vitesse turbulente .....	16
II.1.3. Mise en équation .....	18
II.2. Comportement d'une particule isolée dans un liquide. ....	19
II.3. Flocculation des particules .....	19
II.3.1. Flocculation .....	20
II.3.2. Tassement des vases .....	20
a. Généralités .....	20
b. lois de tassement .....	21
c. Influence des différents paramètres sur le tassement.....	22
c.1. Nature et dimension des particules. ....	22
c.2. Influence du milieu aqueux .....	23
c.3. Influence des sels flocculants et déflocculations. ....	23
c.5. Influence des matières organiques.....	23
c.6. Influence du pourcentage des sables et des silts dans les vases.....	23
c.7. Accélération du tassement des dépôts de vase .....	24
<b>Chapitre III : Rhéologie des suspensions</b> .....	25
III.1. Revue expérimentale : quelques résultats caractéristiques.....	25

III.1.1. Mesure de la viscosité relative de la suspension.....	26
III.1.2. Influence du mouvement brownien sur la viscosité .....	27
III.1.3. Influence du type de l'écoulement sur la viscosité.....	29
III.1.4. Influence du temps .....	30
III.2. Traitement théorique du second ordre de la concentration pour les sphères.....	31
<b>Chapitre IV : Etude expérimentale .....</b>	<b>33</b>
IV.1. Caractéristiques des échantillons de la vase.....	33
IV.2. Expérimentation pour la détermination de la vitesse de chute .....	34
Canevas des essais .....	35
- Préparation de l'échantillon.....	35
- Préparation de la suspension.....	35
- Mesures.....	35
IV.3. Expérimentation pour la détermination des tassements .....	37
IV.4. Expérimentation pour les mesures rhéologiques.....	37
Canevas des essais .....	38
- Préparation des suspensions .....	38
- Choix des deux cylindres .....	38
- Réglage du rhéomètre .....	39
- Essais .....	39
<b>Chapitre V : Résultats et interprétations .....</b>	<b>41</b>
V.1. Vitesse de chute .....	41
V.2. Mesures rhéologiques .....	52
V.3. Etude des tassements .....	60
Conclusion .....	64
Références bibliographiques .....	66
Annexes .....	

## Listes des figures

Fig. I.1. Décomposition d'un écoulement de cisaillement simple en un écoulement de rotation pure et une mouvement de déformation.....	5
Fig. I.2. Thixotropie et rhéopectie .....	11
Fig. I.3. Différents comportements rhéologiques .....	12
Fig. II.1. Forces agissant sur la particules .....	15
Fig. II.2. Variation de $C_f$ en fonction de l'orientation.....	15
Fig. II.3. Orientation de la particule en fonction de son axe de chute .....	16
Fig. II.4. Variation de la vitesse turbulente en fonction de la profondeur.....	17
Fig. II.5. Variation de la vitesse turbulente en fonction de la longueur caractéristique	17
Fig. II.6. Le bilan de transport de la particule.....	18
Fig. II.7. Graphique montrant les différentes phases de tassement.....	22
Fig. III.1. Résultats pour la viscosité relative des suspensions de sphères obtenus par Rutgers(1962) .....	27
Fig. III.2. Evolution de la viscosité relative avec le taux de cisaillement réduit.....	28
Fig. III.3. Evolution générale de la viscosité avec la concentration et le nombre de Picklet.....	28
Fig. III.4. Viscosité relative des suspensions mono dispersées .....	29
Fig. III.5. Discontinuité de la viscosité des suspensions concentrées des sphères ....	30
Fig. III.6. Evolution temporelle de la viscosité relative d'une suspension de sphères.	31
Fig. IV.1. Courbe granulométrique de l'échantillon de la vase .....	34
Fig. IV.2. Dispositif expérimental pour l'étude de la sédimentation.....	34
Fig. IV.3. Les différentes zones.....	36
Fig. IV.4. Disparition de la zone de suspension.....	37
Fig. IV.5. Schéma d'un rhéomètre à cylindres coaxiaux .....	38
Fig. IV.6. Préparation de l'essais.....	39

# Notations



$d$	<i>Diamètre des sédiments</i>
$w$	<i>Vitesse de chute des sédiments</i>
$m$	<i>Masse de la particule</i>
$\rho$	<i>Masse spécifique de l'eau</i>
$\nu$	<i>Viscosité cinématique</i>
$u'$	<i>Vitesse fluctuante</i>
$u^*$	<i>La vitesse de frottement</i>
$T$	<i>Temps de tassement</i>
$C$	<i>Concentration</i>
$T_s$	<i>Taux de tassement</i>
$K$	<i>Coefficient de perméabilité</i>
$\eta$	<i>La viscosité dynamique</i>
$\dot{\gamma}$	<i>Gradient de vitesse</i>
$\tau$	<i>Contrainte de cisaillement</i>
$Z_d$	<i>Côte du dépôt</i>
$Z_{ch}$	<i>Côte de la suspension</i>
$Z_c$	<i>Côte de l'eau claire</i>
$H_c$	<i>Hauteur de l'eau claire</i>
$H_{ch}$	<i>Hauteur de la zone de suspension</i>
$T_c$	<i>Temps cumulé</i>
$\varepsilon$	<i>Coefficient de diffusion</i>
$C_f$	<i>Coefficient du corps</i>
$S$	<i>Maître couple de la particule</i>



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

---

# Introduction

---

## INTRODUCTION GENERALE



Le phénomène de l'envasement des barrages n'est pas spécifique à l'Algérie, mais se rencontre partout où l'on doit régulariser les cours d'eau, si bien que la lutte contre la sédimentation devient une préoccupation essentielle des exploitants et des chercheurs, pour la préservation du potentiel hydraulique mobilisé à des prix de revient onéreux.

Or, la sédimentologie, qui aborde la question d'érosion, de transport solide et de sédimentation, commence toujours à affirmer ses doctrines par différentes approches qui peuvent être résumées en trois catégories comme suit :

### 1. Première catégorie

En intégrant les facteurs naturels du bassin versant, les débits solides ont fait depuis quelques années l'objet de théories et d'expériences relativement poussées. Des dizaines de formules empiriques ont été établies pour estimer entre autre la notion d'érosion spécifique, dont l'objectif principal est d'établir une politique de défense du sol du bassin versant.

### 2. Deuxième catégorie

Elle concerne les processus de distribution, de consolidation et de tassement des sédiments transportés par suspension en période de crues à l'intérieur des retenues. Ces études associent le processus rhéologique de la vase dont le but est d'améliorer l'efficacité des dispositifs de soutirage et augmenter le rendement des systèmes de dragages [16].

### 3. Troisième catégorie

Elle s'intéresse à la dynamique des cours d'eau à l'amont et à l'aval de la retenue et dont l'objectif est de déterminer la capacité de transport des sédiments, soit amenés en période de crues au barrage soit évacués en période de vidange.

Les moyens de lutte contre l'envasement peuvent se résumer au traitement du bassin versant par le reboisement, le soutirage en profitant de l'existence des courants de densité en période des crues et le dragage à l'aide des moyens mécaniques. [16]

Ces moyens de lutte peuvent ne pas s'adapter à tous les pays pour deux raisons essentielles :

- D'une part, l'exploitation et la gestion des barrages en zones dites «humides» caractérisées par des apports d'eau saisonniers importants et réguliers, permet de soutirer par vidange annuelle les sédiments déposés. Ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides, et semi arides ou les barrages ont un rôle d'accumulation de plusieurs apports de crues du fait de la faible et l'irrégularité des pluies.
- D'autre part, l'ampleur et les dommages causés par ce phénomène d'envasement dans les pays humides sont moindres par rapport à ceux constatés dans les pays arides.

Dans ces derniers, les conditions naturelles sont propices à la sédimentation accélérée. Les facteurs qui commandent l'érosion s'y trouve réunis : la fragilité de la structure du sol, l'insuffisance de la couverture végétale et enfin le climat excessif, qui fait succéder les averses torrentielles aux barrages en période de sécheresse absolue.

D'une manière générale, afin de réduire l'impact de l'envasement les études sont orientées vers la recherche des lois d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments en associant leur comportement rhéologique pour réduire l'impact de l'envasement.

Les études élémentaires faites sur les matières en suspension permet dans un premier temps de déterminer l'origine des particules, leur granulométrie ainsi que leur structure morphologique. Mais en réalité, cette étude reste insuffisante pour se faire une idée précise sur le comportement de ces sédiments sous les actions hydrodynamiques, car le mélange ( sol – eau ) forme un complexe variable dans le temps et présente des caractéristiques différentes à celles des particules élémentaires. Ce qui nécessite une étude plus poussée de ces caractéristiques.

A cet effet, notre étude s'intéresse d'une façon expérimentale à l'étude rhéologique des matières en suspension afin de déterminer les paramètres dynamiques. Ces derniers permettraient de préciser le comportement des matières en suspension et définir les caractéristiques physiques d'un dépôt.

L'objectif lointain de cette étude est d'élaborer l'influence des actions hydrodynamiques et d'améliorer les systèmes de soutirage et réduire par conséquent le phénomène de l'envasement.

Cette étude expérimentale porte essentiellement sur l'étude :

- De l'évolution de la vitesse de chute des sédiments en suspension en fonction de la variation temporelle de la concentration,
- De la caractéristique physique de la viscosité et du comportement rhéologique des mixtures,
- Et du phénomène de tassement.

CHAPITRE I

---

# **Analyse de l'aspect théorique du mouvement**

---

# CHAPITRE I

## ANALYSE DE L'ASPECT THEORIQUE

### DU MOUVEMENT DU FLUIDE

L'aspect cinématique des matières en suspension permet de mettre en évidence le mouvement de la particule sans tenir compte des forces origines de ce mouvement. En général, le mouvement se décompose à un mouvement de translation, de rotation et de déformation ( linéaire et angulaire ). Les deux dernières font intervenir des vitesses de déformation ( gradient de vitesse ), l'effet de la viscosité se manifeste.

#### ***1. TENSEUR DU TAUX DE DEFORMATION***

Considérons un écoulement quelconque, Soit  $M_0$  un point quelconque de ce fluide repéré par le vecteur position  $\vec{r}_0$  et pour le quel la vitesse de fluide est  $\vec{u}$ .

Soit  $M$  un point voisin de  $M_0$ , repéré par le vecteur  $\vec{r}$  : la vitesse du fluide, développée en série de Taylor, s'écrit au premier ordre [11] :

$$\vec{u} = \vec{u}_0 + \left( \nabla \vec{u} \right)_0 \cdot (\vec{r} - \vec{r}_0) \quad (I.1)$$

Le tenseur :

$$\left( \nabla \vec{u} \right) = \begin{vmatrix} \partial u_1 / \partial x_1 & \partial u_1 / \partial x_2 & \partial u_1 / \partial x_3 \\ \partial u_2 / \partial x_1 & \partial u_2 / \partial x_2 & \partial u_2 / \partial x_3 \\ \partial u_3 / \partial x_1 & \partial u_3 / \partial x_2 & \partial u_3 / \partial x_3 \end{vmatrix}$$

$$\vec{r} = \vec{r}_0$$

peut se mettre sous la forme de la somme de la partie symétrique et de sa partie antisymétrique :

$$\vec{E} = (E_{ij}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \vec{\Omega} = (\Omega_{ij}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (I.2)$$

Il est facile de vérifier que :  $\vec{u}$  s'écrit alors :

$$\vec{u} = \vec{u}_0 + \vec{\omega}_0 \times (\vec{r} - \vec{r}_0) + \vec{E} \times (\vec{r} - \vec{r}_0) \quad (I.3)$$

Ou le vecteur  $\vec{\omega}$  a pour composantes les trois composantes non nulles du tenseur  $\vec{\Omega}$  et est égal à la moitié de la vorticité  $\vec{\zeta}$  de  $\vec{\zeta} = \overline{rot}(\vec{u})$ . Ainsi, le mouvement du fluide peut se décrire comme la somme d'un mouvement de translation, d'un mouvement de rotation et d'une déformation. [11]

Prenons par exemple le cas d'un écoulement de cisaillement simple, décrit par :

$$u_1 = Gx_2, \quad u_2 = u_3 = 0 \quad (I.4)$$

On peut le décomposer en un mouvement de rotation de vitesse angulaire  $\vec{\omega} = (0, 0, -1/2G)$  et d'un mouvement de déformation décrit par le tenseur symétrique (tenseur de taux de déformation) :

$$\vec{E} = \begin{vmatrix} 0 & (1/2)G & 0 \\ (1/2)G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (I.5)$$

Cette décomposition est visualisée par la figure I.1 ci-après.

Dans le cas d'un écoulement purement élongationnel, décrit par

$$u_1 = 2Gx_1, \quad u_2 = Gx_2, \quad u_3 = Gx_3 \quad (I.6)$$

Il est facile de voir qu'il n'y a pas de composante rotationnelle et que le tenseur symétrique s'écrit :

$$\vec{E} = \begin{vmatrix} 2G & 0 & 0 \\ 0 & -G & 0 \\ 0 & 0 & -G \end{vmatrix} \quad (I.7)$$

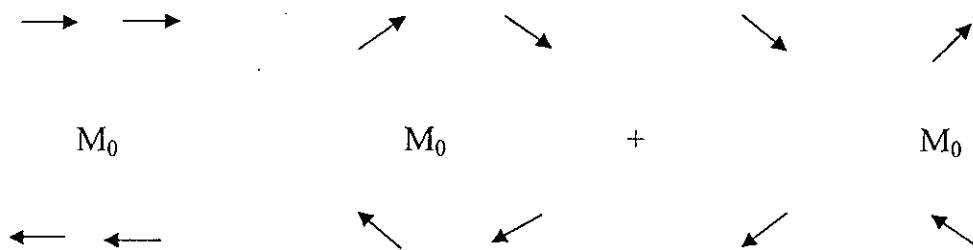


Figure I.1 : Décomposition d'un écoulement de cisaillement simple en un écoulement de rotation pure et en un mouvement de déformation. [11]

Dans tous les cas, la trace du tenseur  $\vec{E}$  est égale à :

$$\vec{v} \cdot \vec{u} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \text{div } \vec{u} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (\text{I.8})$$

(En utilisant la convention de sommation d'Einstein). Dans le cas d'un fluide incompressible, la composante purement élongationnelle de l'écoulement peut être considérée comme la superposition d'une dilatation isotrope dans laquelle la vitesse d'expansion est  $(1/3)\vec{v} \cdot \vec{u}$  et d'un mouvement de déformation pure sans variation de volume.

Nous utilisons également un autre type de représentation dans le cas des écoulements bidimensionnels :  $u_1 = u_1(x_1, x_2)$ ,  $u_2 = u_2(x_1, x_2)$ ,  $u_3 = 0$

Dans un fluide incompressible, un tel écoulement peut se mettre sous la forme linéarisée: [11]

$$\vec{u} = G \begin{vmatrix} 0 & \xi & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \overrightarrow{M_0 M} \quad (\text{I.9})$$

Où  $G$  représente l'intensité du cisaillement et  $\xi$  est un paramètre compris entre -1 et +1 qui caractérise la forme de l'écoulement :

$\xi = -1$  Rotation pure .

$\xi = 0$  Cisaillement simple .

$\xi = +1$  Déformation pure.

## 2. TENSEUR DE CONTRAINTE

Deux types de forces s'exercent sur un élément de volume quelconque d'un fluide :

- des forces de volume (pesanteur, force électromagnétique, ..)
- des forces de surface d'origine moléculaire qui traduisent le transfert d'impulsion à travers la surface de l'élément de volume considéré. Ce transfert co-répond à la fois à l'impulsion transportée par les molécules qui traversent



l'élément de surface (qui est la contribution principale dans le cas d'un gaz) et à la résistance opposée à la déformation par les petites édifices moléculaires qui existent dans un liquide. [11]

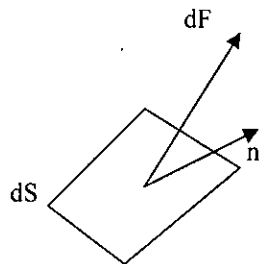
Sur un élément de surface, de normale  $\vec{n}$ , d'aire  $dS$ , s'exerce la force  $\vec{dF}$  définie par :

$$\vec{dF} = \vec{\sigma} \cdot \vec{n} \cdot dS$$

Où  $\vec{\sigma}$  est le tenseur de contrainte qui est symétrique.

Dans un repère cartésien, on a :

$$\vec{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix}$$



avec :  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  dans le cas d'un fluide isotrope.

La pression dans un fluide en mouvement est définie à partir de la trace de ce tenseur :

$$p = -(1/3)\sigma_{ij}$$

### 3. RELATION ENTRE CONTRAINTES ET DEFORMATION

La relation la plus simple entre le tenseur visqueux des contraintes et celui du taux de déformation est une relation linéaire : [5]

$$d_{ij} = 2\mu \left( E_{ij} - \frac{1}{3} \Delta \delta_{ij} \right) \tag{I.10}$$

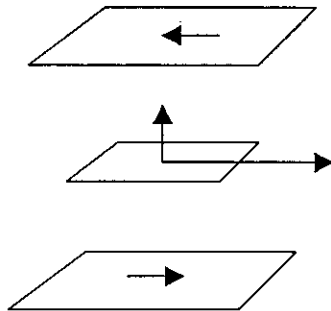
Où :  $\Delta = \vec{v} \cdot \vec{u}$  est nul si le fluide est incompressible et  $\mu$  est un scalaire ne dépendant ni des  $E_{ij}$ , ni des  $d_{ij}$ , appelé viscosité dynamique.

Les fluides qui vérifient cette relation sont appelés newtoniens. Si un tel fluide est soumis à un cisaillement simple, tel que nous l'avons défini, les seules composantes non nulles du tenseur visqueux des contraintes sont  $d_{12} = d_{21} = \mu G$ .

Alors, sur un élément de surface, d'aire  $dS$  et normale  $\mathbf{n} = (0,1,0)$ , s'exerce une force élémentaire  $d\mathbf{F}$  avec :

$$\overline{d\mathbf{F}} = \overline{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \overline{\mathbf{n}} \cdot dS = \begin{vmatrix} -P & \eta G & 0 \\ \eta G & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} \quad dS = \begin{vmatrix} \eta G \\ -P \\ 0 \end{vmatrix} dS \quad (\text{I.11})$$

On peut voir que la composante normale de la surface qui s'exerce sur l'élément de surface est liée uniquement à la pression et que la composante tangentielle est reliée uniquement à la viscosité  $\mu$  et à l'intensité  $G$  du cisaillement.



Dans de nombreux cas cependant, et en particulier celui des colloïdes, la relation constitutive entre le tenseur des contraintes visqueuses et celui du taux de déformation est plus complexe. Pour ne pas nous encombrer des complications excessives, disons que la viscosité de cisaillement  $\eta$  n'est plus suffisante pour décrire le comportement d'un fluide dans un écoulement tel que le cisaillement simple. Non seulement cette viscosité peut dépendre du taux de cisaillement  $G$ , mais encore, on doit tenir compte des contraintes normales  $d_{11}$ ,  $d_{22}$ , et  $d_{33}$ . [5]

En fait, comme par construction du tenseur des contraintes visqueuses on a  $d_{11} + d_{22} + d_{33} = 0$  et comme les contraintes normales tiennent compte de la pression on utilise en général, les deux différences  $d_{11} - d_{22}$  et  $d_{22} - d_{33}$ .

Pour un fluide newtonien, ces différences de contraintes normales sont nulles ( pour un cisaillement simple ) et la viscosité de cisaillement  $\mu$  est une constante ( à température et pression constante ) . Pour un fluide non newtonien, ces trois fonctions viscosimériques ( $\mu, d_{11}-d_{22}$  et  $d_{22}-d_{33}$ ) dépendent du taux de cisaillement. [14]

Les figures I.3 résument les principaux types de comportement de  $\mu$ , on y a reporté la contrainte tangentielle  $d_{12}$  en fonction du taux de cisaillement  $G=2E_{12}$  de sorte que la pente des courbes représente la viscosité. Outre le comportement d'un fluide newtonien (1), on a représenté ceux d'un fluide pseudoplastique dont la viscosité augmente avec le taux de cisaillement (exemple le suspension d'amidon dans l'eau, suspension de  $TiO_2$ ), ou diminue avec le taux de cisaillement. On a également représenté le comportement d'un fluide de Casson (3) , d'un fluide de Bingham (4) caractérisé par une viscosité constante pour une contrainte supérieur à un seuil de résistance élastique et un comportement élastique en dessous de ce seuil ( exemple : suspension d'oxyde d'uranium ou de thorium dans l'eau ..), et en fin d'un fluide complexe (5). [14]

Ces différents types de comportement sont la plupart du temps représentés mathématiquement par des expressions empiriques à deux ou trois paramètres dont on trouvera l'expression.

### **3.1. Fluide newtonien:**

$$\frac{F}{A} = \eta \cdot \frac{dv}{dx} = \tau \quad (I.12)$$

$\eta$ : la viscosité dynamique

(poise en CGS )

$\frac{dv}{dx} = S$  : Le gradient de vitesse ; la vitesse par la quelle les différentes couches se déplacent les unes par rapport aux autres; il représente taux de cisaillement aux quel le fluide est soumis

$\frac{F}{A}$  : la force par unité de surface nécessaire pour produire le cisaillement .[14]

$$\frac{\tau}{S} = \eta = \frac{\text{Effort de cisaillement}}{\text{Taux de cisaillement}}$$

### 3.2. Fluide plastique BINGHAM

La relation entre la force de cisaillement et le taux de cisaillement n'est linéaire qu'à partir d'une certaine vitesse. Au-delà, la courbe est croissante et coupe l'axe des abscisses en un point qui représente la contrainte critique de l'écoulement des fluides plastiques ou de BINGHAM

L'équation du fluide de BINGHAM s'écrit

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{dv}{dx} \quad (\text{I.13})$$

$\tau_y$  : la tension en dessous de la quelle il n'y a pas de mouvement

$\eta$  : la viscosité dynamique, qui dans le cas d'un fluide de BINGHAM pur serait constante. [14]

### 3.3. Fluide plastique de CASSON

De nombreuses suspensions ne suivent pas la loi de BINGHAM et après avoir dépassé la limite d'écoulement, la variation de la force de cisaillement  $\tau$  en fonction du gradient de vitesses  $dv/dx$ , se présente suivant une courbe concave ou convexe.

La viscosité dans ce cas n'est plus constante mais varie en fonction du gradient de vitesse.

Certains auteurs admettent alors que la contrainte de cisaillement peut être définie à partir de la tangente à la courbe rhéologique. [14]

$$(\tau - \tau_B)^n = \eta \frac{dv}{vx} \quad (\text{I.14})$$

### 3.4 .Fluide pseudo-plastique

Ces fluides forment un groupe intermédiaire entre les fluides Newtonien et plastiques, la courbe coupe l'axe des abscisses à son origine mais la viscosité décroît lorsque le taux de cisaillement augmente. [14]

### 3.5. Fluide plastique complexe

Dans ce cas la valeur de l'effort de cisaillement en fonction du taux de cisaillement n'était pas la même suivant que l'on est en vitesses croissantes ou décroissantes.

Enfin, on peut dire que les suspensions de sédiments fins, dans différents milieux aqueux peuvent suivre des lois rhéologiques différentes suivant leur état de tassement ou ce qui revient au même suivant leurs concentrations. [14]

Une suspension de vase pourra être newtonienne, en faibles concentrations ou, au contraire se rapprocher des fluides schématisés par les lois de BINGHAM ou de CASSON pour des concentrations élevées. De plus, les dépôts de sédiments pélétiqes pourront présenter, pour certaines concentrations des phénomènes de thixotropie ou de dilatance caractérisés par une modification de leurs propriétés sous une action mécanique extérieure (**figure I.2**) .

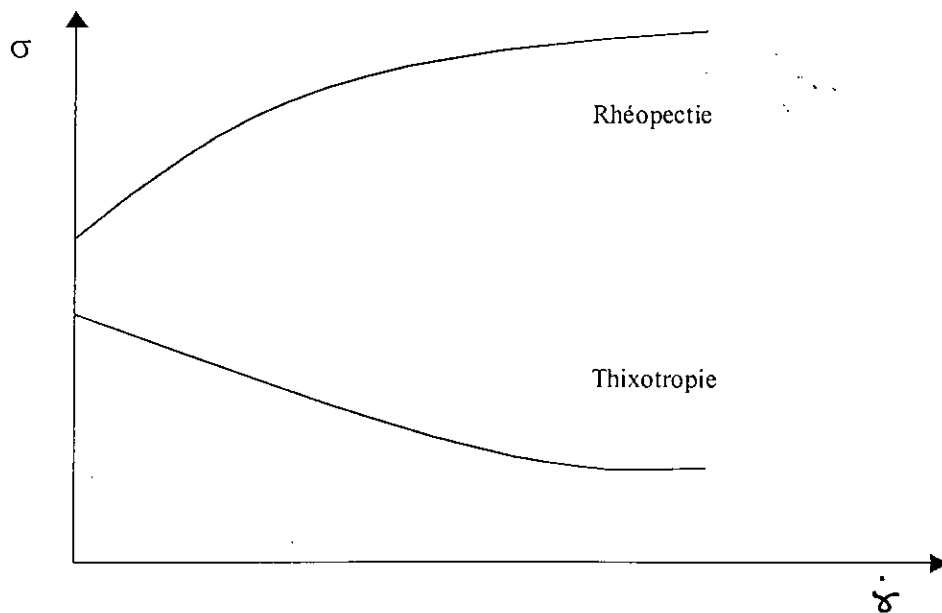


figure I.2 . Thixotropie et rhéopéctie. [14]

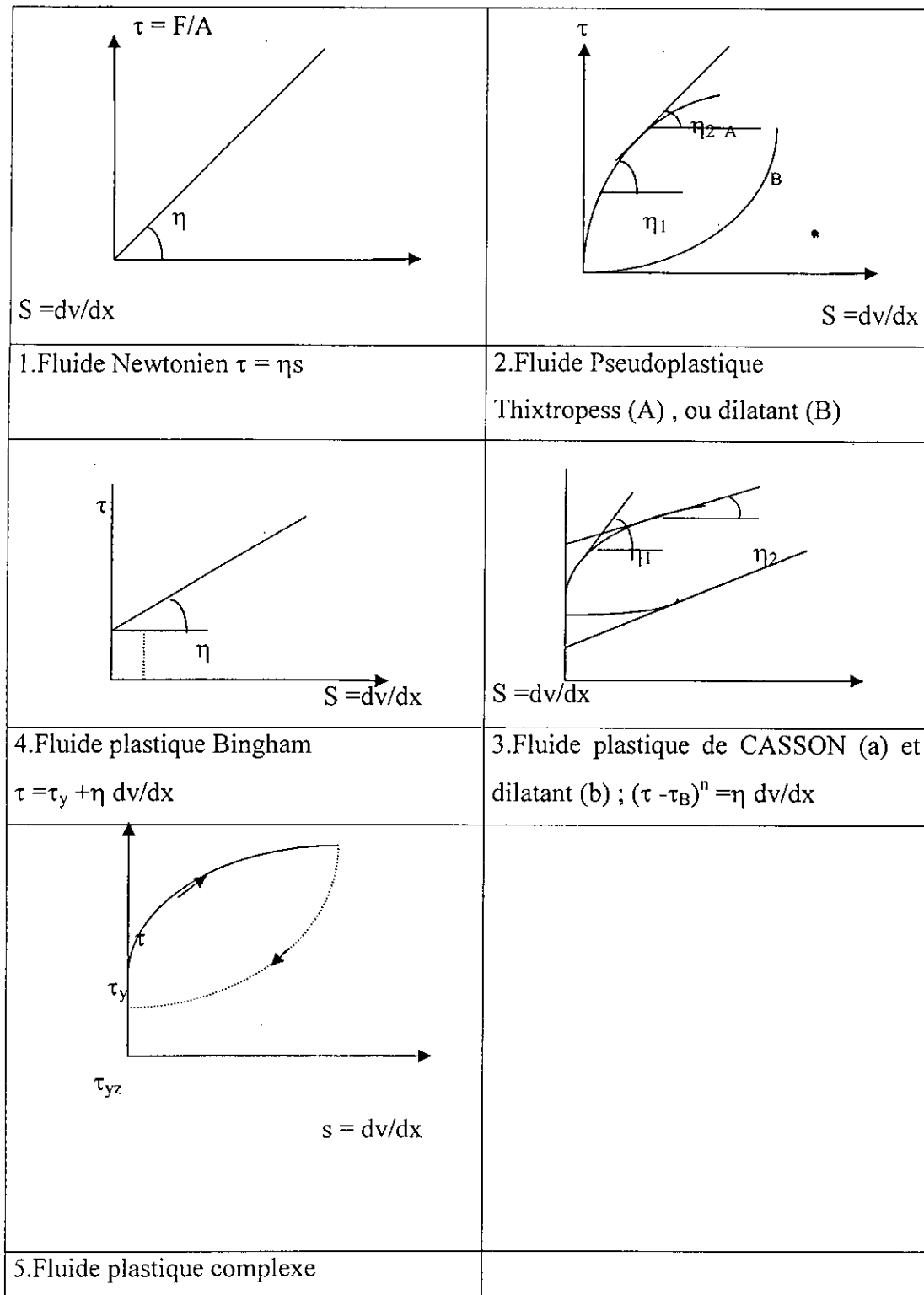


Figure I.3 : Différents comportements rhéologiques [14]

CHAPITRE II

---

# **Aspect théorique de la suspension**

---

## CHAPITRE II

### ASPECT THEORIQUE DE LA SUSPENSION

Après avoir étudié le comportement cinématique des particules en suspension dans un écoulement fluide, sachant que le maintien en suspension est dû à la turbulence, tant que la contrainte turbulente verticale est supérieure à la vitesse de chute, la particule se maintient en suspension. Dans le cas contraire, elle décante avec une vitesse de chute exprimée généralement par la loi de Stokes. Or, cette loi globale n'est valable que pour un nombre de Reynolds faible. Après, la particule se dépose et au cours du temps il y a tassement.

#### **II.1. INTERPRETATION DU PHENOMENE DE LA SUSPENSION**

La suspension résulte à la superposition de deux phénomènes : [6]

- la tendance des particules à tomber ( Chute ).
- Le soulèvement dû à la turbulence.

Avant d'examiner ces deux phénomènes qui sont la base de la compréhension théorique, essayons d'abord, par un exemple simple de comprendre les causes qualitatives de la suspension.

Soit une particule solide idéal de diamètre  $d$ , de vitesse de chute en eau  $w$ . On plonge cette particule dans un écoulement turbulent, la vitesse turbulente ( $u'$ ) pourrait prendre à priori des valeurs  $u' > w$ . Il arrivera que la particule rencontre des vitesses  $u' > w$  : elle sera alors soulevée par la vitesse de l'écoulement. En analysant cette description qualitative, nous faisons apparaître plusieurs catégories de problèmes qui régissent le phénomène : [1]

- La turbulence dans le fluide sans suspension ( $w = 0 \quad u' \neq 0$ ).
- L'action de la turbulence sur les particules en suspension.
- L'action éventuelle de la particule sur la turbulence qu'aurait dans le fluide sans suspension.



L'approche théorique ou expérimental pour ces différentes catégories se heurte à de trois grosses difficultés : Les théories élaborées ne donne idée élémentaire du mécanisme de la suspension, et encore seulement dans le cas idéalement simple de particule sphérique [6]. En résumé la théorie de ces problèmes impliquerait des développements considérables disproportionnés avec leur rendement effectif en résultats concrets qui nous intéressent.

### II.1.1. Tendence des particules à tomber

La particule dans un fluide au repos subit de la part de ce dernier une force (Traînée) qui peut être :

- Soit proportionnelle à la vitesse de la particule si l'écoulement autour de l'obstacle est laminaire et s'il n'y a pas d'écoulement.
- Soit proportionnelle au carré de la vitesse dans le cas contraire (résistance de forme)

La limite entre ces deux formes de résistance correspondant généralement à un nombre de Reynolds  $Re$  de l'ordre de 5 à 10. ( $Re(\text{eau}) = 100 v d$  donne une vitesse de 0.5 à 1 mm/s pour une particule de 1 mm de diamètre).

Que l'écoulement est laminaire ou turbulent : [1]

$$\tau = C_f \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{v^2}{2} \quad (\text{II.1})$$

$\tau$  : Force exercée par le fluide sur la particule.

$\rho$  : Masse volumique du fluide.

$S$  : Maître couple de la particule.

$v$  : vitesse de la particule.

$C_f$  : Coefficient de la force de la particule.

En choisissant le cas idéal, la particule sphérique, la résolution des équations de Navier- Stocks, donne la traînée laminaire de la forme :

$$m \tau = 6\pi \cdot \mu \cdot R \cdot v \quad (\text{II.2})$$

et le coefficient de résistance  $C_f = \frac{24}{Re}$

Nous pouvons en déduire théoriquement pour cette particule de masse  $m$  en chute libre dans le fluide au repos, sa vitesse de chute  $w$ . [1]

$$\tau = m.g$$

$$C_f \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{w^2}{2} = m.g$$

$$\text{D'où : } w = \sqrt{\frac{2mg}{C_f \cdot \rho \cdot S}} \quad (\text{II.3})$$

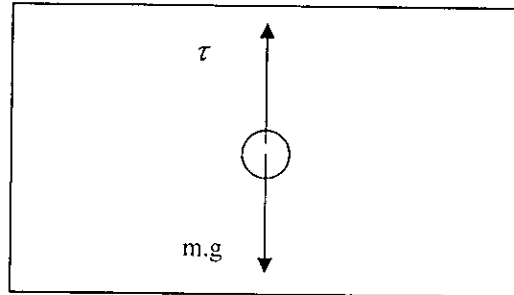


Fig. II.1. Forces agissant sur la particule

$\tau$  : Force exercée par le fluide sur la particule.

$\rho$  : Masse volumique du fluide.

$S$  : Maître couple de la particule.

$v$  : vitesse de la particule.

$C_f$  : Coefficient de la force de la particule.

Cette relation permet donc de définir avec une certaine rigueur la vitesse de chute  $w$  d'une sphère en eau calme, et reste valable dans un principe pour les particules non sphériques.

Le coefficient  $C_f$  et  $S$  changent en fonction de l'utilisation et de l'orientation de la configuration :

$$C_{f2} > C_{f1}$$

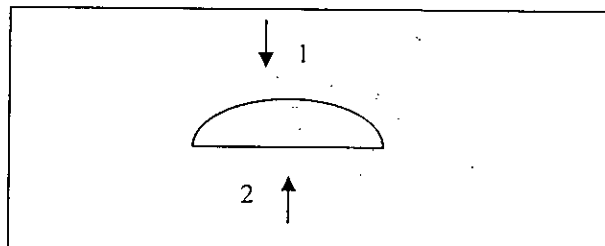
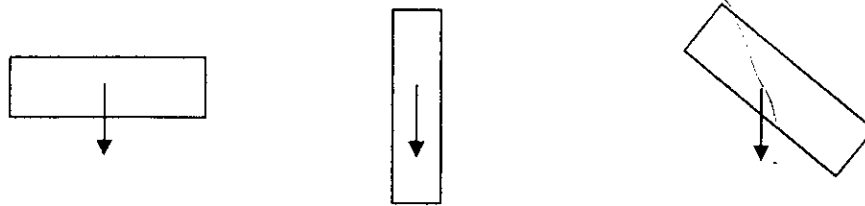


Fig II.2. Variation de  $C_f$  en fonction de l'orientation

Il existerait donc plusieurs vitesses limites de la particule considérées suivant son inclinaison par rapport à l'axe d'attaque ( figure II.1 )



**Figure II.3 : Orientation de la particule en fonction de son axe de chute  
(Cf diffère) [1]**

Pour des corps de forme géométrique simple, la vitesse de chute  $w$  pourrait varier facilement dans des rapports de 1 à 3 si on pouvait fixer la position de chute de la particule solide.

Ce qui est exacte, c'est que même s'il existe une vitesse de chute, et une orientation stable, pour un certain corps l'homologue de  $w$  (vitesse de chute en eau turbulente) peut ne pas exister. [1]

La turbulence faisant tourner la particule considérée en tous sens. Ceci présente une certaine importance quand à la valeur à attribuer à la théorie de la suspension.

### II.1.2. Vitesse turbulente

Sans rentrer dans le formalisme complexe de la turbulence, nous pouvons dire qu'à la vitesse moyenne on superpose une vitesse turbulente de composante variable en intensité et en direction. Soit  $u'$  cette composante. [1]

$$u' = u - \bar{u}$$

$u'$  est une fonction du temps.

La valeur quadratique s'exprime par :

$$\overline{u'^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'^2 dt \quad (\text{II.4})$$

Généralement, les modèles de turbulence ont pour objectif d'exprimer les corrélations des vitesses de fluctuation ( Contraintes de Reynolds  $\overline{\rho u'_i u'_j}$  ) en fonction des expressions des vitesses moyennes.

A cet effet, plusieurs models existent ( Van Kerman, Prandlt,...). Sans les rappeler, on se limite au model déterminé expérimentalement qui donne la fluctuation de vitesse en fonction de la profondeur relative de la position de la particule :

Cette expression est :

$$\overline{(u')^2} = (u_*)^2 \left(1 - \frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{II.5}) \quad [1]$$

avec :  $u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$

$\tau$  : Contrainte de frottement à la paroi.

Sa valeur maximum est auprès de la paroi et vaut en fonction de la vitesse de frottement  $\overline{(u')^2}_{(z=0)} = u_*^2$  ,

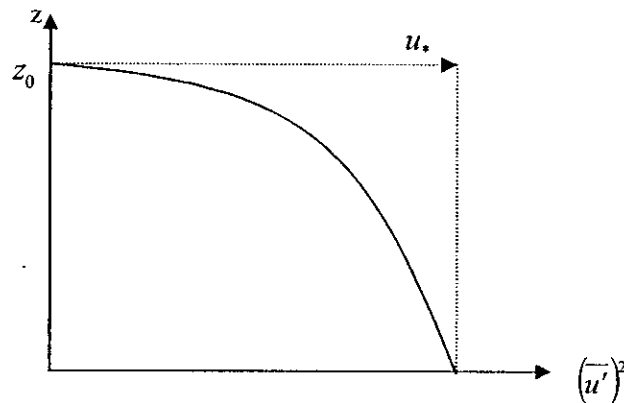


Fig. II.4. Variation de la vitesse turbulente en fonction de la profondeur

### II.1.3. Mise en équation

La mise en équation de la suspension est basée sur la juxtaposition des deux phénomènes : [6]

- de la tendance à l'uniformisation des concentrations sous l'influence de la turbulence ( $\overline{u'}$ ).
- de la tendance à la concentration vers le bas sous l'influence de la gravité ( $w$ ).

En faisant le bilan de transport ( figure II.2) ; le transport vers le haut est du à la

turbulence et égal à :  $-\varepsilon \frac{d\overline{c}}{dz}$  (II.8)

Avec  $\varepsilon$  le coefficient de diffusion.

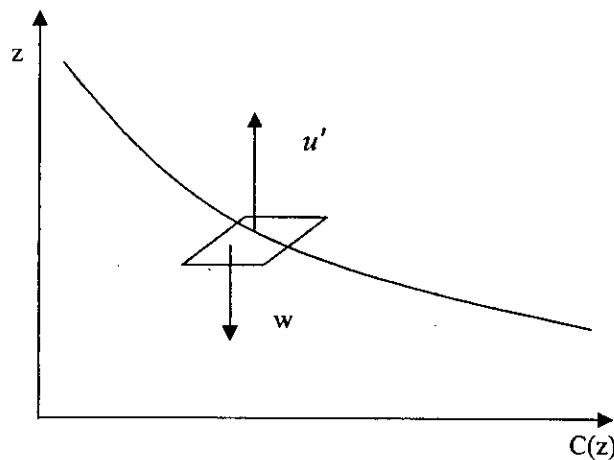


Figure II.6. le bilan de transport de la particule

Le transport vers le bas est dû à la gravité est égal à  $\overline{c}.w$

En régime permanent, ces deux quantités sont égales :

$$-\varepsilon \frac{d\overline{c}}{dz} = \overline{c}.w \quad (II.9)$$

$$d'où : \overline{c}.w + \varepsilon \frac{d\overline{c}}{dz} = 0 \Rightarrow \log \overline{c} = \int \frac{w}{\varepsilon} dz$$

L'intégration de cette relation peut se faire si on connaît la relation qui lie  $\varepsilon$  à  $z$ ,  $w$  étant considéré comme constante.

Nous remarquons la simplicité de cette équation établie par la juxtaposition des deux phénomènes sans tenir compte d'autres facteurs qui interviennent dans le domaine de la suspension ( tel que le mouvement brownien ).[6]

## II.2. COMPORTEMENT D'UNE PARTICULE ISOLEE DANS UN LIQUIDE - MOUVEMENT BROWNIEN

Jusqu'à maintenant, on a établi l'équation précédente donnant la variation de la concentration en fonction de la vitesse de chute  $w$  et du coefficient de diffusion  $\epsilon$ .

En réalité, une telle particule va subir en plus de l'action purement hydrodynamique (Traînée et le poids), une action brownien qui se manifeste lorsque le fluide est immobile.

Une telle particule va subir de la part du fluide deux types d'actions ; D'une part, l'action purement hydrodynamique qui se concrétise par l'existence de contraintes exercées à la surface de séparation entre le fluide et la particule, D'autre part l'action brownienne. Ainsi, par exemple, une sphère de Rayon  $a$  placée dans un cisaillement simple ( $\vec{u}(Gx_2, 0, 0)$ ) va être entraîné par le fluide avec une vitesse de translation égale à celle du fluide (en son centre) et une vitesse de rotation égale à  $G/2$ , c'est-à-dire à la demi vorticité du fluide soit exactement celle du mouvement de rotation solide qui est l'une des composantes de cisaillement simple. La même sphère, est en outre, soumise à l'effet du mouvement brownien qui va se manifester par des changements de position et d'orientation aléatoire, et donc induit une diffusion de translation caractérisée par le coefficient de diffusivité de translation  $\epsilon_t$ , et une diffusion de rotation caractérisée par le coefficient de diffusivité de rotation  $\epsilon_r$ . En comparant ces deux coefficients de diffusivité on fait apparaître un nombre sans dimension qui compare les effets purement hydrodynamiques et purement brownien (Nombre De Picklet). [1]

## II.3. FLOCCULATION DES PARTICULES

Contrairement aux éléments grossiers du type sable, gravier et galets qui se comportent individuellement dans un milieu aqueux, les sédiments très fins de type limons, argiles et vases dispersés dans les eaux naturelles sont soumis, dans la plupart des cas, à des phénomènes de floculation et forment des agrégats gorgés d'eau dans les vitesses de chute sont très supérieures à celles des particules élémentaires. [13]

### **II.3.1. La floculation**

Une suspension d'une vase dans l'eau sera mieux floculé que les particules élémentaires seront plus petites, leur concentration dans la suspension est plus importante, le milieu contiendra d'avantages de sels floculants et que la température de l'eau sera très élevée.

Dans un milieu aqueux floculant, les vitesses de chute moyennes des particules pélagiques ayant à l'état individuel des dimensions très différentes sont comprise entre  $1.5 \cdot 10^{-1}$  et  $6 \cdot 10^{-1}$  mm/s pour une concentration de 10 g/l .

Or dans un milieu défloculant et pour les mêmes conditions, les particules se comportent d'une manière individuelle et présentent des vitesses de chute moyennes comprise entre  $10^{-5}$  mm/s et  $10^{-1}$  mm/s [13]

Les études faites par le LCHF (laboratoire Central d'Hydraulique de France ) ont montré que la floculation, caractérisé par un facteur F défini comme étant le rapport entre la vitesse moyenne de chute libre des flocons ( WF 50 % ) dans un milieu aqueux floculant et la vitesse moyenne de chute libre des particules élémentaire à l'état défloculant ( WD 50% ) :

$F = WF 50 \% / WD 50\%$  varie comme l'inverse du carré du diamètre équivalent " d " des particules élémentaires [13]

### **II.3.2. Tassement des vases**

#### **a. Généralités**

Les particules qui se décantent par gravité sur les fonds vont s'écraser sous leurs propres poids, en perdant progressivement leur eau de structure (les eaux interstitielles et les eaux de la double couche), avec arrangement des particules solides et leurs eaux absorbées.

Ces particules vont former progressivement un matériau variable dans le temps par suite de l'effet des tassements, qui se présente dans un premier temps comme un liquide lorsqu'il renfermera de l'eau interstitielle d'une quantité notable, il deviendra plastique lorsque les liaisons interarticulaires se feront par l'eau de la double couche. Il atteindra enfin l'état solide lorsque les particules seront en contact les unes avec les autres. [14]

### b. Loi de tassement

Les études sur les tassements naturels des différents sédiments fins ont montré que la concentration moyenne d'un dépôt varie comme le logarithme du temps avec des différents domaines de tassement (Fig.II.3 ) correspondant à la vitesse entravée des flocons. [14]

Dans ces conditions de tassement, la variation de la concentration  $C_v$  définit comme étant le poids des particules sèches par volume de mixture répond à l'expression :

$$C_v = \alpha \log t + \beta \quad (\text{II.10})$$

$t$  : étant le temps de tassement

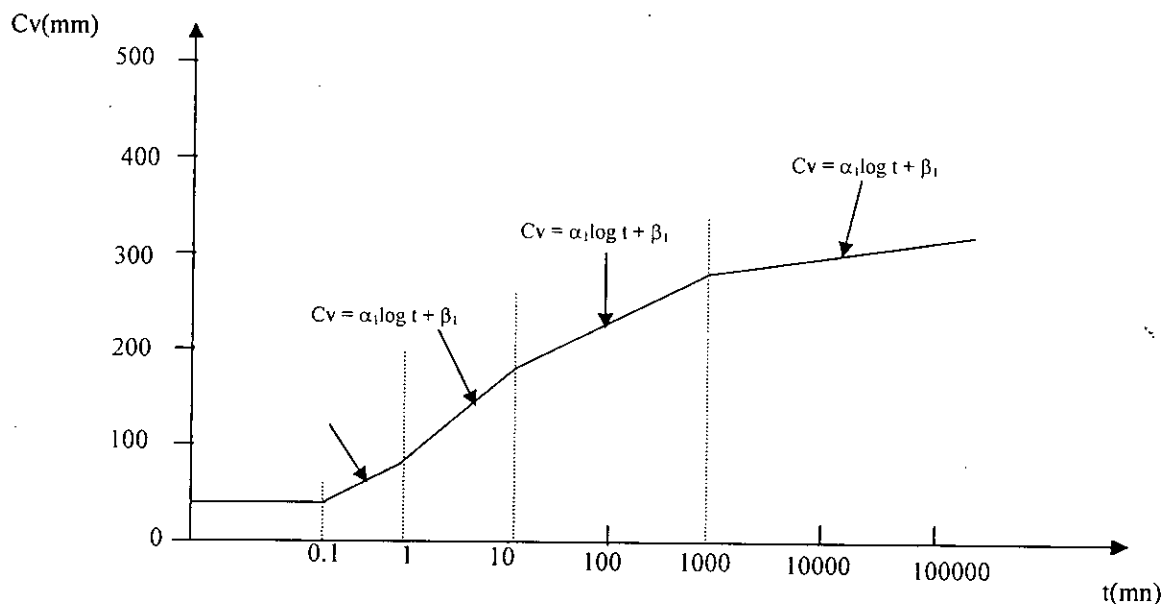
$\alpha$  : un facteur qui dépend particulièrement des diamètres des particules.

$\beta$  : un facteur lié au milieu aqueux.

Le tassement et la consolidation d'un sol sont en étroite relation avec la perméabilité, c'est à dire la possibilité d'évacuation de l'eau du sol.

Pour les matériaux à perméabilité moyenne ou forte (coefficient de perméabilité  $K$  supérieur à  $10^{-5}$  m/s ), il y aura une consolidation rapide voire instantanée. C'est le cas des matériaux sableux ou graveux. Par contre pour les matériaux à faible perméabilité ( $K$  moins de  $10^{-5}$  m/s ) tel que les sables vaseux, les vases ou les boues, la consolidation des dépôts sera très lente.





FigII.2 Graphique montrant les différents phases de tassements [14]

### c. Influence des différents paramètres sur le tassement

Le Tassement des vases dépend de plusieurs paramètres, parmi ces paramètres, on peut citer : [14]

La nature des sédiments des particules, le milieu aqueux , les conditions de sédimentation, la température, la présence des matières organiques, conditions de drainage, pourcentage des sables et des silts obtenus dans les mixtures, ... etc.

#### c.1. Nature et dimension des particules

Le tassement des vases, boues ou limons dépend de la dimension, de la forme et de la charge électrique des particules solides formants les dépôts.

D'une façon générale, la concentration moyenne du culot de tassement, en eau douce naturelle sera d'autant plus importante que le diamètre des particules élémentaires soit plus grand.

Comme il a été déjà dit, la formule des tassements est  $T_s = \alpha \log t + \beta$

La valeur des facteurs  $\alpha$  est une fonction croissante des diamètres.

### *c.2. Influence du milieu aqueux*

La salinité des eaux ne modifie pas très fortement la concentration moyenne d'un culot de tassement [14], et aucune loi simple n'a pu être dégagée des nombreuses mesures des tassements des vases dans les eaux de salinités croissantes faites par Migniot.

### *c.3. Influence des sels flocculants et déflocculants*

Si la salinité des eaux n'a qu'une influence limitée sur le tassement, il n'en est pas de même de certains sels flocculants ou déflocculants et de l'acidité des eaux.

En traitant le milieu aqueux avec des flocculants ou des déflocculants, on pourra avoir pour le même matériau plusieurs complexes (sol - eau) avec des caractéristiques différentes; les matières flocculantes ou déflocculantes accélèrent ou retardent les tassements des vases. [14]

### *c.4. Influence des conditions de sédimentation*

Les conditions de sédimentation des matériaux très fins auront une influence appréciable sur le tassement des mixtures des vases qui n'auront pas la même concentration moyenne après un temps de dépôt déterminé suivant l'épaisseur et les concentrations initiales des dépôts. [14]

### *c.5. Influence des matières organiques*

En provoquant des réactions chimiques, la matière organique peut s'exercer sur la flocculation (ou la dispersion) des suspensions argileuses. Cette action dépendra de la nature des argiles contenues dans les vases.

### *c.6. Influence du pourcentage des sables et des silts dans les vases*

Si la mixture de vase a une viscosité forte, le tassement s'effectue uniformément. Dans ce cas, la variation de la concentration globale en fonction du temps sera d'autant plus rapide que le dépôt contiendra du sable.

Le tassement d'une vase, et sa consolidation en fonction du temps, dépendront du pourcentage du sable qu'elle contient, le tassement sera d'autant plus rapide que le dépôt contiendra d'éléments sableux. [14]

CHAPITRE III

---

# **Rhéologie des suspensions**

---

*c.7. Accélération du tassement des dépôts de vases*

Le tassement d'une vase peut être augmenté, soit par le drainage, soit par utilisation de produits chimiques qui pourront diminuer ou accélérer la consolidation du dépôt.

Il est également possible de modifier le tassement d'une vase ou d'une boue par le procédé électrique en agitant simultanément par les phénomènes d'électrophorèse (attraction des particules chargées négativement à l'anode) et par les phénomènes d'électro-osmose (attraction de l'eau à l'anode). Avec cette méthode, on peut obtenir en quelques heures une concentration du culot deux fois plus importante que celle que l'on aurait pu avoir après un an de tassement naturel.

Il est aussi possible de freiner le tassement et de maintenir pendant plusieurs jours des vases à l'état parfaitement fluide, cela peut se faire si on intervertit le sens du courant. [14]

## **CHAPITRE III**

### **RHEOLOGIE DES SUSPENSIONS**

Les relations entre le tenseur de contraintes et le tenseur de déformations rappelées dans le premier chapitre montrent que le comportement non newtonien est complexe : car la viscosité dépend non seulement du taux de déformation mais aussi des contraintes. Il est très difficile par conséquent d'établir théoriquement ces lois de comportement même dans le cas idéal d'une particule isolée dans un fluide (chapitre II). Dans ce cas, seule l'expérience peut donner des résultats susceptibles d'être appliqués mais ne peuvent être extrapolés. Donnons quelques principaux résultats caractéristiques de l'expérimentation.

#### ***III.1 REVUE EXPERIMENTALE: QUELQUES RESULTATS CARACTERISTIQUES***

Nous avons vu que l'un des buts de la rhéologie était de caractériser une relation entre le tenseur des contraintes et celui du taux de déformation et que cette relation était une relation locale.

Dans le cas d'une suspension, qui est un milieu inhomogène et désordonné, la définition d'une grandeur, telle que la viscosité, ne peut être que celle d'une grandeur effective, c'est à dire celle d'un milieu homogène qui, soumis aux mêmes forces imposées ou au même mouvement imposé, développerait la même réponse que la suspension. Pour cela, il est nécessaire que la distance moyenne entre particules soit beaucoup plus petite que la longueur caractéristique de l'écoulement imposé à la suspension (diamètre du tube dans un écoulement de Poiseuille, distance entre les plans dans un cisaillement simple de façon à ce qu'on puisse traiter la suspension comme un milieu continu, l'idéal serait de pouvoir déterminer dans tous les cas la réponse de la suspension à partir de la connaissance des propriétés rhéologiques du fluide et des particules, mais cela n'est possible que dans le cas des suspensions très diluées.

### III.1.1. Mesures de la viscosité relative de la suspension

En 1906, Einstein a obtenu, en analysant la dissipation d'énergie, une relation entre la viscosité  $\mu$  d'une suspension diluée de sphères solides et celle du fluide porteur  $\mu_0$ . [2]

$$\mu = \mu_0 \left( 1 + \frac{5}{2} C \right) \quad (\text{III.1})$$

Où  $C$  est la concentration volumique des sphères. Il s'agit d'une relation valable aux concentrations évanescences, dont la linéarité traduit simplement le fait que ces concentrations des particules contribuent indépendamment les unes des autres à la dissipation d'énergie par viscosité.

De nombreuses mesures de viscosité ont été faite avec des sphères de taille variées dans divers fluides par exemple : Vand ( 1948 ), Rutgers ( 1962) et Thomas (1965 ) ont rassemblé un certain nombre de ces résultats pour essayer d'en faire une synthèse. [2]

Les résultats collectés par Rutgers sont représentés sur la figure III.1 : on voit que le désaccord entre les mesures extrêmes est énorme. Un facteur 2 pour les concentrations de l'ordre de 20 %, un facteur 100 pour des concentrations de l'ordre de 50 %. Même si on tient compte d'erreurs expérimentales, il est claire que la concentration volumique ne peut en aucun cas être le seul paramètre dont on ait à tenir compte pour définir la viscosité d'une suspension des sphères solides. Nous allons successivement examiner l'influence du mouvement brownien, du type de l'écoulement des structures qui apparaissent dans les suspensions concentrées, du temps.

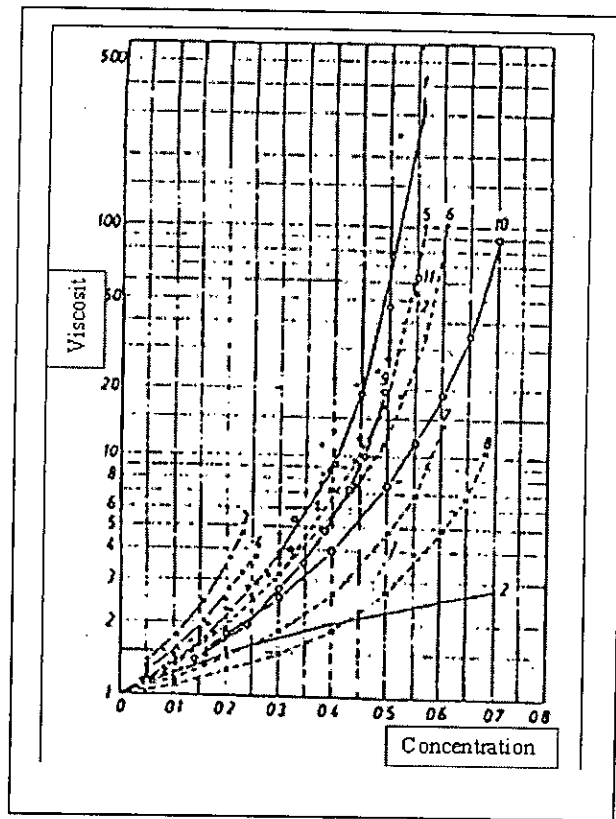


Figure III.1 : Résultats pour la viscosité relative des suspensions de sphères , obtenues par Rutgers (1962). [2]

### III.1.2. Influence du mouvement brownien sur la viscosité

En ce qui concerne le mouvement brownien, des résultats très caractéristiques ont été obtenus par Kieger ( 1972) sur des particules mono dispersées de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre. [7], [2]

Sur la figure III.2, on a rapporté la viscosité d'une suspension concentré (  $C=50\%$ ) en fonction du taux de cisaillement réduit  $\mu_0 Ga^3 / KT$  . On voit que la viscosité présente deux valeurs extrêmes l'une à forte viscosité pour les faibles cisaillements, l'autre faible viscosité pour les forts cisaillements réduits. On a un comportement non newtonien fluidifiant.

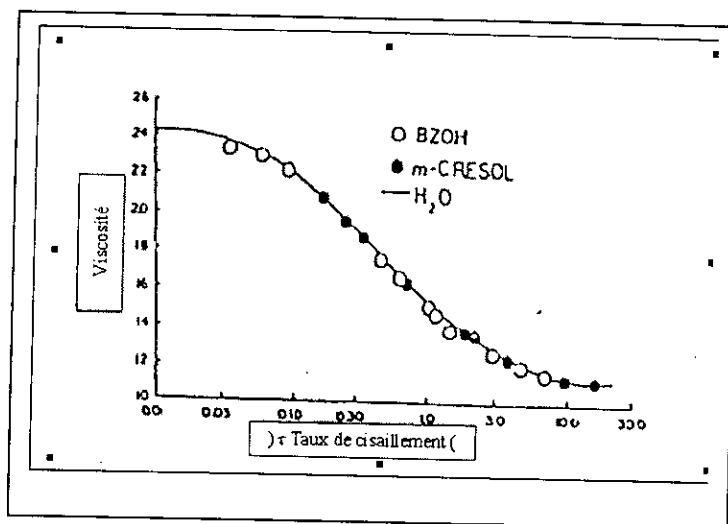


Figure III.2 : Evolution de la viscosité relative avec le taux de cisaillement réduit. La concentration est 0.5 et le diamètre des sphères est de  $1\mu$ . [2]

La différence entre la viscosité à faible cisaillement et à celle à fort cisaillement augmente avec la concentration et on peut tracer un ensemble de courbes représentées sur la figure III.3 ou on voit que l'on a un comportement apparemment newtonien.

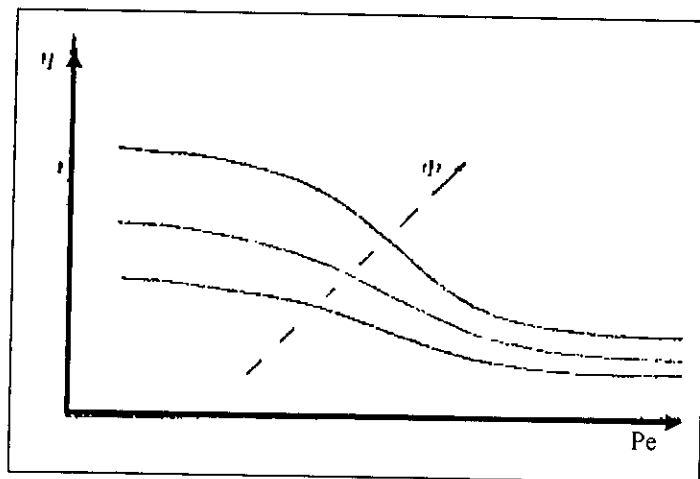


Figure III.3 : Evolution générale de la viscosité avec la concentration et le nombre de Peclet . [2]



### III.1.3. Influence du type de l'écoulement sur la viscosité

D'autres résultats intéressants qui montrent l'influence du type de l'écoulement ont été obtenus par Pätzold ( 1980 ). Ce dernier a étudié des sphères mono dispersées (de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  de diamètre) dans des écoulements simple ou de type élongationnel (obtenu en faisant couler la suspension à travers un orifice). On voit dans la figure III.4, que la nature de l'écoulement a peu d'importance jusqu'à vers 30% de concentration mais qu'au delà un écart d'importance de sens variable se produit. [8]

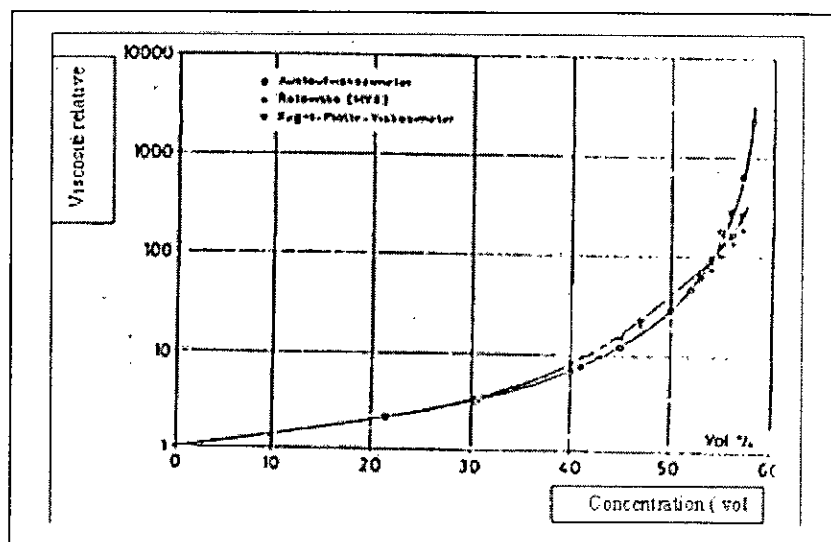


Figure III.4 : viscosité relative des suspensions monodispersées de sphères dans un écoulement de cisaillement simple et dans un écoulement élongationnel [8]

Des résultats plus spectaculaires ont été obtenus par Hoffman ( 1972) avec des sphères de PVC de  $1.24 \mu\text{m}$ , suspendus dans différents liquides et pour différentes concentrations (figure III.5) . [8]

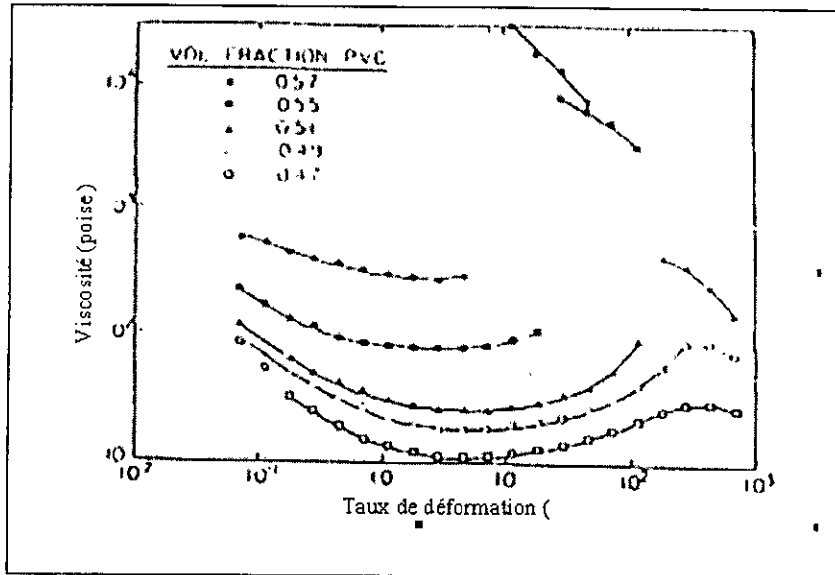


Figure III.5 Discontinuité de la viscosité des suspensions concentrées de sphères. [8]

Aux concentrations les moins élevées ( 47 et 49 %), on constate un comportement fluidifiant puis épaississant puis à nouveau fluidifiant. Mais après une discontinuité dans la viscosité la structure de la suspension est beaucoup moins ordonnées.

#### III.1.4. Influence du temps

Enfin, pour terminer cette rapide revue expérimentale, signalons les résultats de Gala Maria et Acrivos ( 1980 ) qui ont observé une révolution temporelle dans la viscosité relative sur de longues périodes de temps, avec des sphères de polystyrène de 40 à 50  $\mu\text{m}$  de diamètre dans un mélange de huile de sélécones ( figure. III.6 ) . [8]

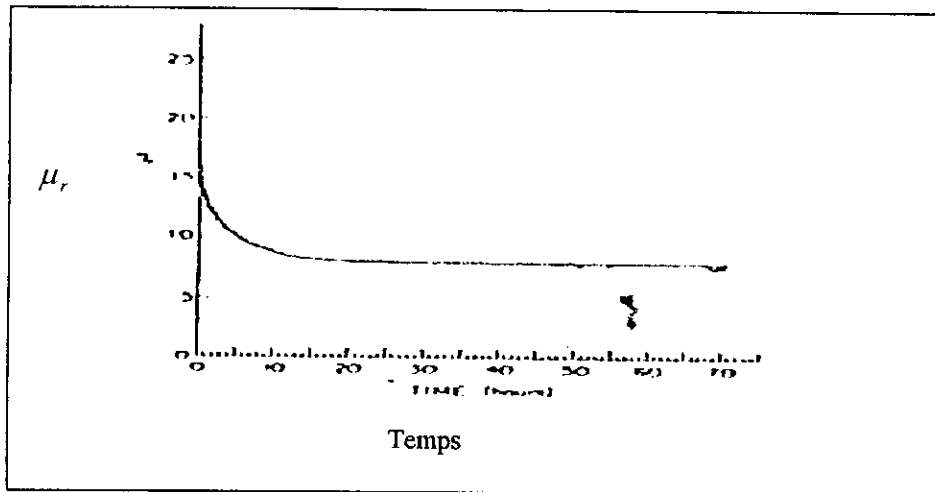


Figure III.6 Evolution temporelle de la viscosité relative d'une suspension de sphères. [8]

On a donc un comportement thixotropique mais avec une échelle de temps considérable de l'ordre de 10 heures. On a également pour la viscosité asymptotique un comportement fluidifiant. asymptotique.

Cette rapide revue expérimentale met en évidence la richesse extraordinaire du comportement de suspensions constituées de sphères solides qui sont, de loin, les objets les plus simples. Il est alors facile d'admettre que, jusqu'à présent au moins, aucun traitement théorique unique des suspensions n'ait pu être mis sur pied et que devant cette situation très complexe, le nombre de relations plus au moins empiriques "établies" par différents auteurs soit impressionnant.

### III.2. TRAITEMENT THEORIQUE AU SECOND ORDRE EN CONCENTRATION POUR LES SPHERES

Des résultats théoriques n'ont été obtenus que pour des concentrations relativement faible, et étendue pour des fortes concentrations, citons la plus importante relation donnant la variation de la viscosité en fonction de la concentration montrée par Batchlor: [1]

$$\mu = \mu_0 \left( 1 + \frac{5}{2} C + KC^2 \right) \text{ avec :}$$

Péclet  $\ll 1$  :  $K=6.2$  quel que soit le type de l'écoulement.

Péclet  $\gg 1$  :  $K = 7.6$  pour un écoulement purement élongationnel.

$K$  inconnu pour un écoulement de cisaillement simple.

$K=5.2$  pour un écoulement avec  $P=1$ .

Les autres relations ne diffère de celle ci que par le coefficient  $K$ .

Citons par exemple, comme autre relation, celle de Bedeaux D et Col (1977) :

$$\mu(0,0) = \mu_0 \left( 1 + \frac{5}{2} C + 4.8C^2 \right) \quad [1]$$

En résumé, on remarque que toutes ces relations exprime la variation de la concentration sous forme de monôme d'ordre 2 de la concentration.

CHAPITRE IV

---

# **Etude Expérimentale**

---

## **CHAPITRE IV**

### **ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT**

### **RHEOLOGIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DE LA VASE**

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

C'est dans cet objectif que nous allons déterminer expérimentalement le comportement rhéologique de la suspension constituée de particules de vase du barrage, déterminer la vitesse de chute en fonction de l'évolution temporelle de la concentration et déduire le phénomène du tassement.

Notre étude est faite sur des échantillons de vase du barrage de Foum El Gherza prélevés à l'aval du barrage et préparés au niveau du laboratoire de l'hydraulique de l'ENP.[3]

#### ***IV.1. CARACTERISTIQUE DE S ECHANTILLONS DE LA VASE***

A partir des caractéristiques géologiques du bassin versant de de Foum El Gharza, nous pouvons dire que la vase du barrage est constituée essentiellement de marne, gypse, calcaire et sable. [3]

La courbe granulométrique de nos échantillon montre que les diamètres de ces éléments sont au dessous de 40 microns ( Figure IV.1)

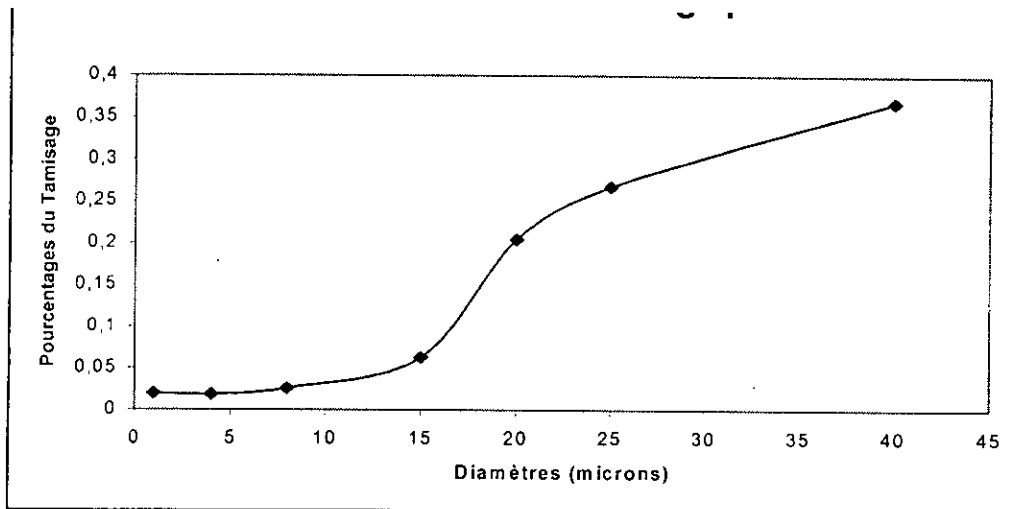


Figure IV.1 : Courbe granulométrique de l'échantillon de la vase

#### IV.2. EXPERIMENTATION POUR LA DETERMINATION DE LA VITESSE DE CHUTE

L'objectif de cette première partie est d'étudier la vitesse de chute en fonction de la concentration.

Le dispositif expérimental de sédimentation disponible au niveau du laboratoire d'hydraulique de l'Ecole Nationale Polytechnique est constitué de dix tubes gradués de 06 cm de diamètre et de 1 m de hauteur, ces tubes sont maintenus verticalement (Figure IV.2)

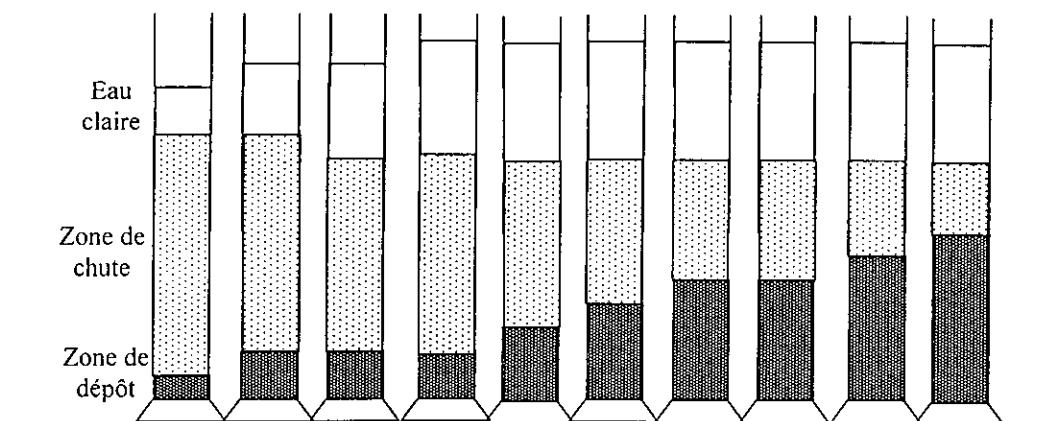


Figure IV.2 : Dispositif expérimental pour l'étude de la sédimentation [3]

### Canevas des essais

- **Préparation de l'échantillon**

Pour préparer les échantillons, nous avons utilisé un broyeur et des tamis.

Nous avons pris les différents échantillons ayant des dimensions considérables, puis nous les avons introduit dans un broyeur pour obtenir des particules fines de diamètre moins de quarante ( 40 ) microns.

- **Préparation de la suspension**

Nous avons pris les différents tubes après les avoir lavés avec de l'eau distillée, ensuite nous les avons rempli avec un litre de cette eau. Dans chaque tube, nous avons introduit de la vase avec des concentrations différentes. Nous avons considéré trois séries de concentrations :

- 1<sup>er</sup> série : faibles concentrations :  $C = 3 \text{ g/l}$  ,  $6 \text{ g/l}$  et  $10 \text{ g/l}$
- 2<sup>ème</sup> série : moyenne concentrations :  $C = 20 \text{ g/l}$  et  $50 \text{ g/l}$
- 3<sup>ème</sup> série : Forte concentrations :  $C = 100 \text{ g/l}$  ,  $150 \text{ g/l}$  et  $200 \text{ g/l}$ .

Après avoir agité les tubes remplis de ces mixtures, nous les avons maintenu verticalement.

- **Mesures**

Après un certain temps, on a distingué trois zones, une zone d'eau claire, une zone de suspension et une zone de dépôt ( figure IV.3 )



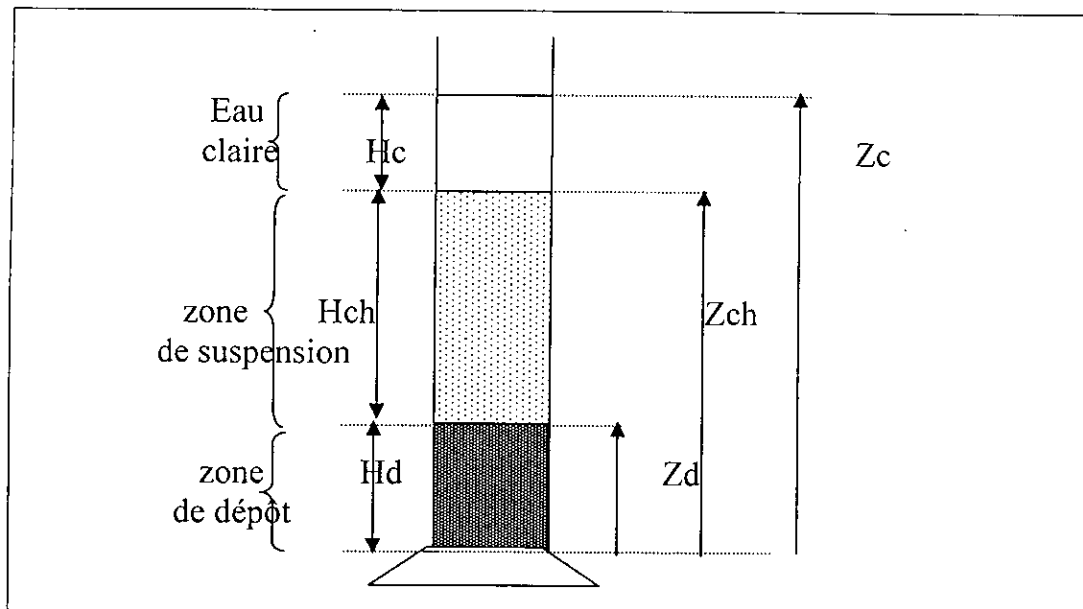


Figure VI.3: Les différentes zones [3]

Pour chaque concentration, on a suivi l'évolution temporelle de  $Z_c$ ,  $Z_{ch}$  et  $Z_d$  respectivement côté de l'eau claire, côté de zone de chute et côté de zone de dépôt, (les hauteurs :  $H_c$ ,  $H_{ch}$ ,  $H_d$  seront ainsi déterminées par calculs )

Pour chaque concentration, trois essais ( Trois agitations ) ont été faits.

#### IV.3. EXPERIMENTATION POUR LA DETERMINATION DES TASSEMENTS

Les tassements sont effectués sur le même dispositif expérimental que précédemment ( voir figure IV.2 )

Après un certain temps, la zone de chute dans les tubes de solutions a disparu. Nous n'observons que la zone de l'eau claire et la zone du dépôt (Figure IV.3) Cette dernière se tasse dans le temps. Nous avons suivi l'évolution temporelle des tassements. Nous avons observé ce phénomène clairement que pour les fortes concentrations ( 100, 150, 200 g/l).

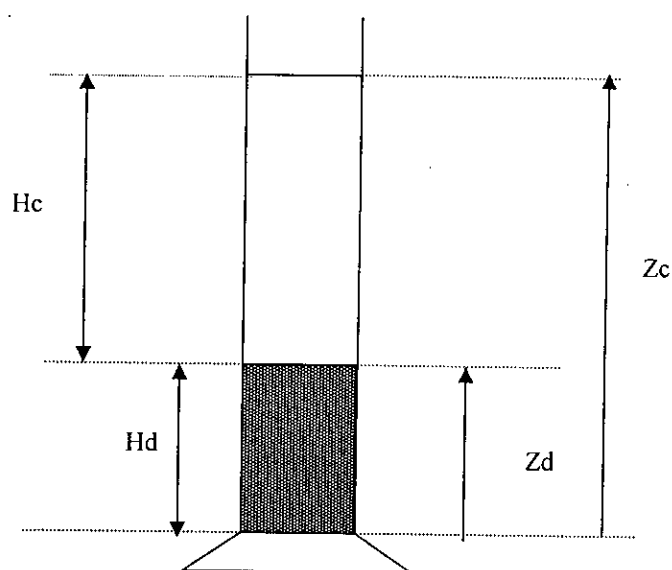


Figure IV.4 : Disparition de la zone de suspension [3]

#### IV.4. EXPERIMENTATION POUR LES MESURES RHEOLOGIQUES

L'objet des mesures rhéologiques est la détermination expérimentale, à partir de grandeurs macroscopiques (couple, vitesse...), de la loi de comportement de notre vase [9]. Cette loi de comportement relie le tenseur des taux de déformation au tenseur de contraintes, qui sont des grandeurs indépendantes des volumes de matériaux étudiés. Souvent, cette recherche se réduit à une relation entre la contrainte tangentielle de cisaillement noté  $\tau$ , et le gradient de vitesse de cisaillement.[9]

Dans notre étude, on déterminera le comportement rhéologique de la vase en suspension sous différentes concentrations.

L'appareil utilisé pour cette étude est un rhéomètre rotationnel Low Shear 40. Il est conçu pour effectuer des tests à vitesse imposé et à contrainte contrôlé. C'est un rhéomètre à cylindres coaxiaux. [12]

Ce rhéomètre est composé de deux cylindres en rotation l'un par rapport à l'autre (figure IV.4 ). Dans notre cas, le cylindre intérieur est fixe et le cylindre extérieur est mobile. [12]

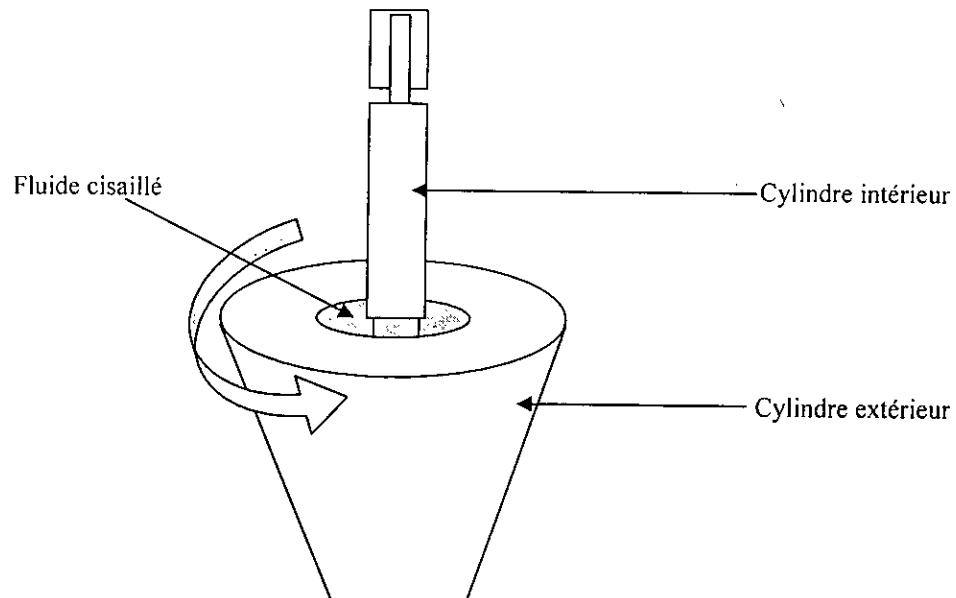


Figure IV.5 : Schéma d'un rhéomètre à cylindres coaxiaux [12]

### Canevas des essais

#### • Préparation des suspensions

Nous avons pris des tubes d'essai, nous les avons remplis 10 ml d'eau distillée, nous avons introduit dans chaque tube de la vase avec des concentrations différentes.

#### • Choix des deux cylindres

Le choix des cylindres dépend des caractéristiques des mixtures. Afin de les choisir nous avons effectué des essais préliminaires qui nous permettent d'avoir des mesures pour les différentes vitesses de rotation programmées, notre choix s'est porté sur :

- Un cylindre extérieur de 6.5 mm de diamètre.
- Un cylindre intérieur de 4 mm de diamètre et 21 mm de hauteur.

#### • Réglage du rhéomètre

L'équilibre du rhéomètre est assuré par une aiguille qui doit être dans une fourchette conseillée.

Nous imposons par programmation différentes vitesses de rotation qui nous donnent les différents taux de déformation.

- **Essais**

Pour chaque concentration, nous introduisons la suspension dans cylindre extérieur à l'aide d'une seringue (Figure IV.5.a), nous le déposons sur sa base dans le rhéomètre (Figure IV.5.b). Nous fixons le cylindre intérieur, puis nous le faisons descendre pour le faire rentrer dans le cylindre extérieur avec une grande précision (Figure IV.5.c)

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

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

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

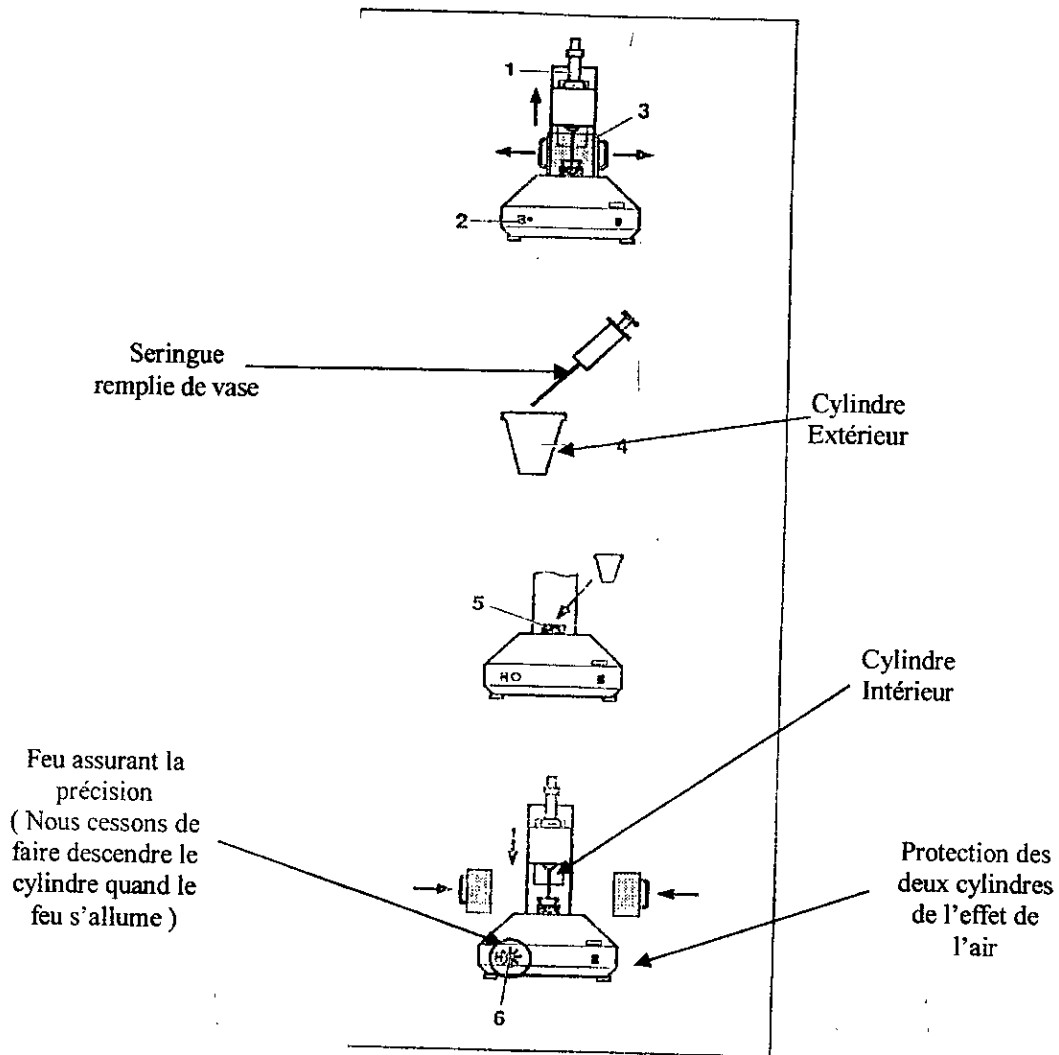


Figure IV.6 : Préparation de l'essai

CHAPITRE V

---

# Résultats et Interprétations

---

## **CHAPITRE V**

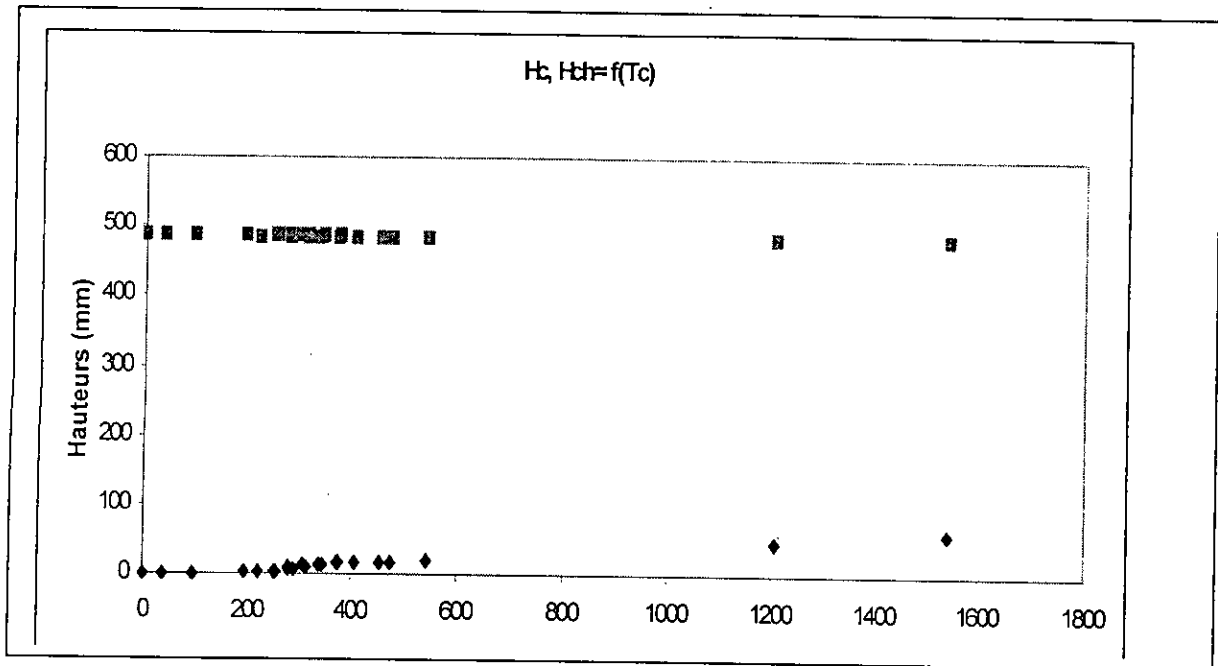
### **RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

Cette étude expérimentale sur un dispositif simple nous a permis de mettre en évidence les caractéristiques physiques et rhéologiques des échantillons de sédiments prélevés sur le site du delta de vase du barrage. On s'est limité à la détermination des lois d'évolution de la vitesse de chute, de la viscosité dynamique et du phénomène du tassement en fonction de la variation temporelle de la concentration.

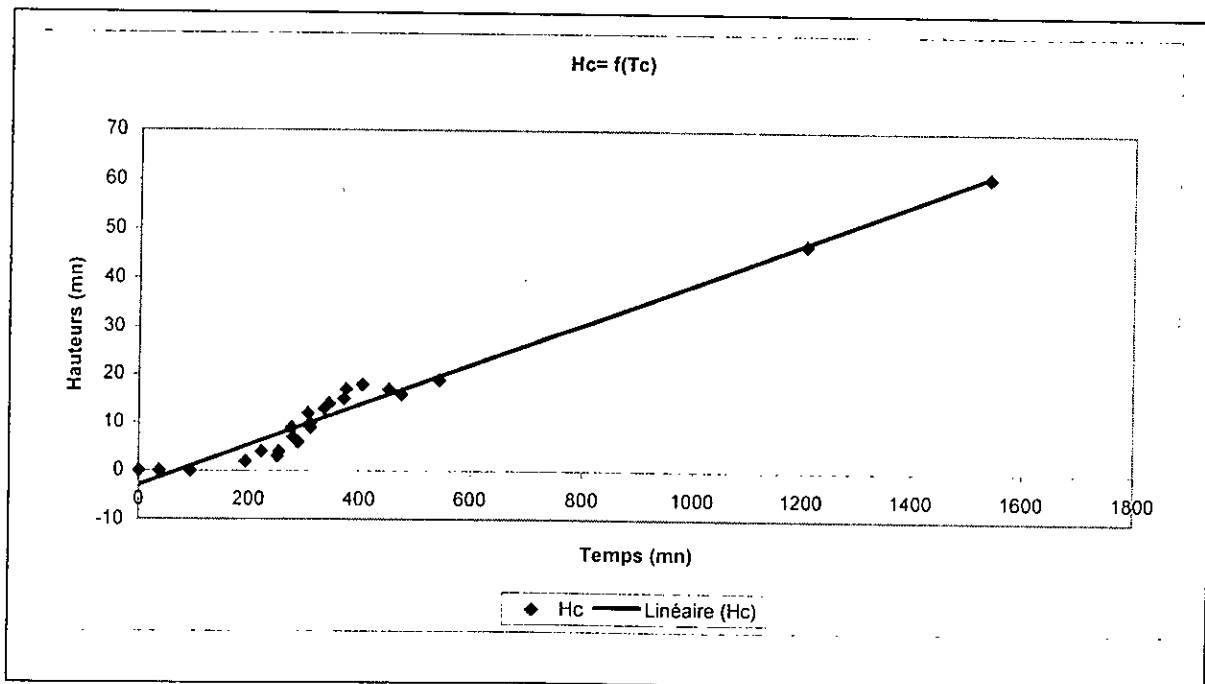
Ces lois d'évolution de ces paramètres physiques sont nécessaire pour déterminer le bilan des forces qui interviennent dans les équations dynamiques de l'évolution du phénomène (Force du frottement visqueuse et turbulente)

#### **V.1. VITESSE DE CHUTE**

Les résultats sont représentés sur les graphes ; la première série de graphe donne la hauteur de la zone de l'eau claire et celle de la zone de suspension en fonction du temps. On a représenté pour chaque essai deux graphes, le premier qui nous donne la hauteur de la zone de suspension et celle de l'eau claire, nous a permis de valider nos résultats. Le deuxième graphe nous donne la variation de la hauteur de la zone de chute en fonction du temps, nous avons représenté dans ce dernier la courbe de tendance linéaire, et nous avons donner pour chaque courbe sa pente qui représente la vitesse de chute.

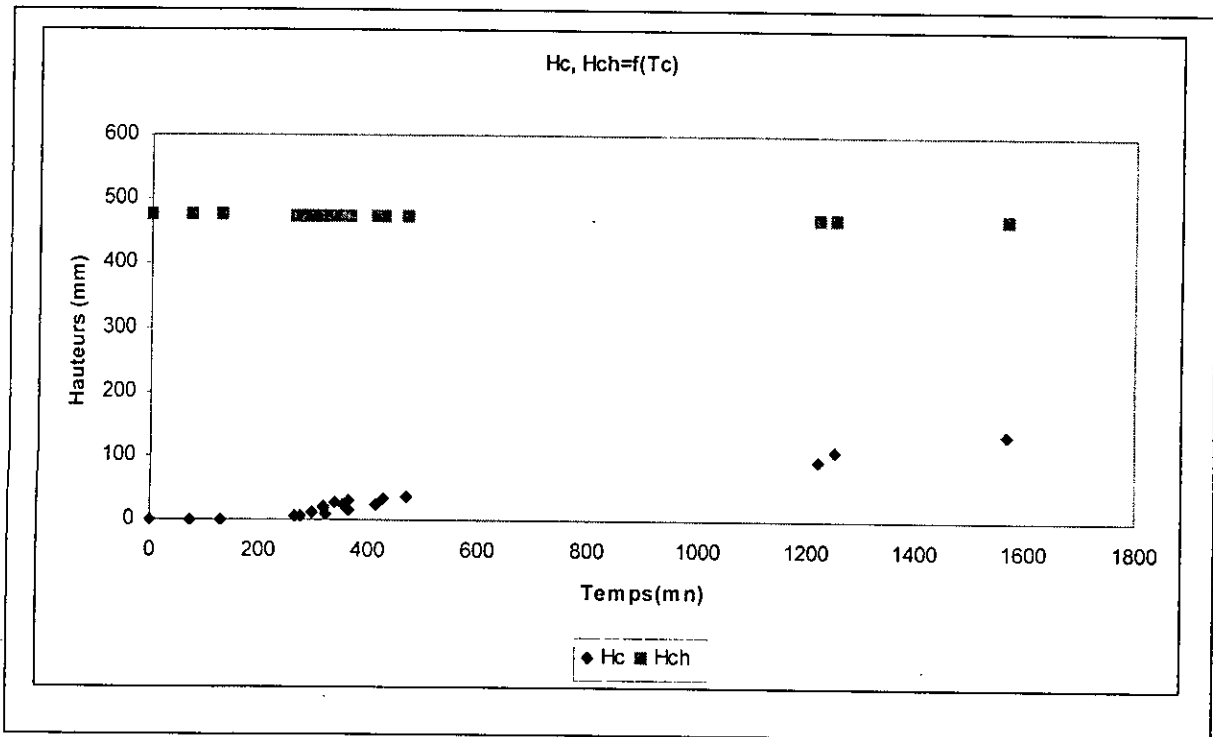


Graphe V.1. Evolution de  $H_c$  et  $H_{ch}$  en fonction du temps pour  $c = 3g/l$

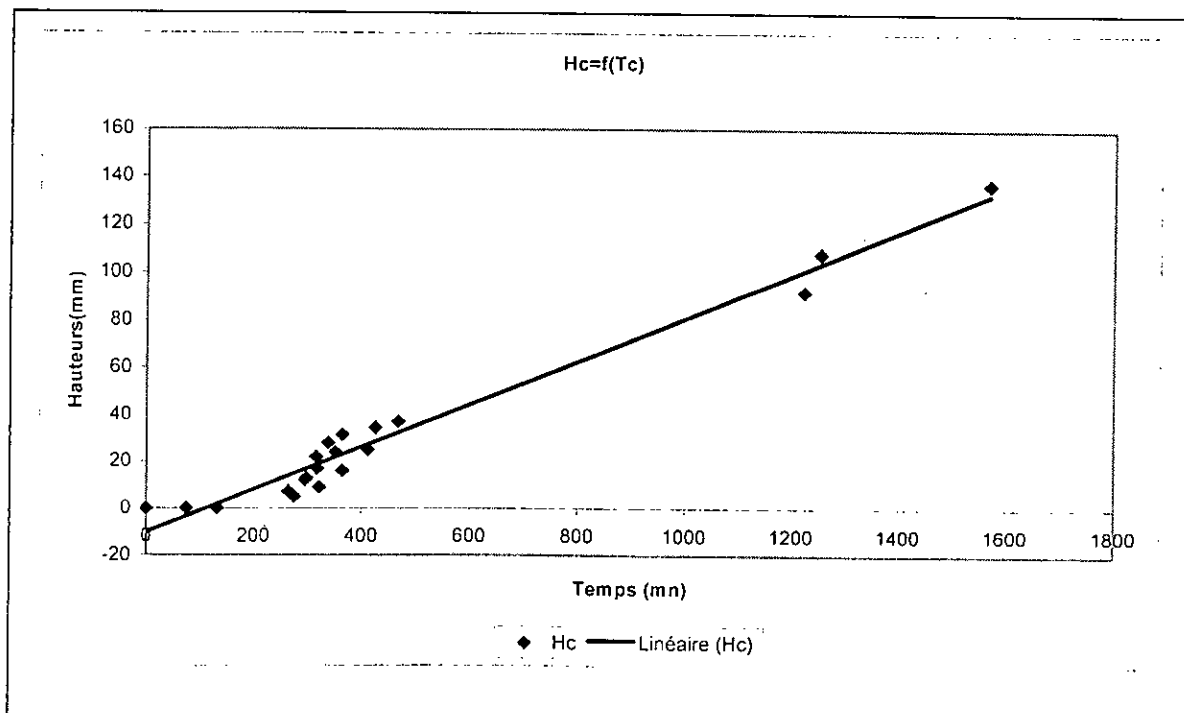


Graphe V.2. Evolution de  $H_c$  en fonction du temps pour  $c = 3g/l$

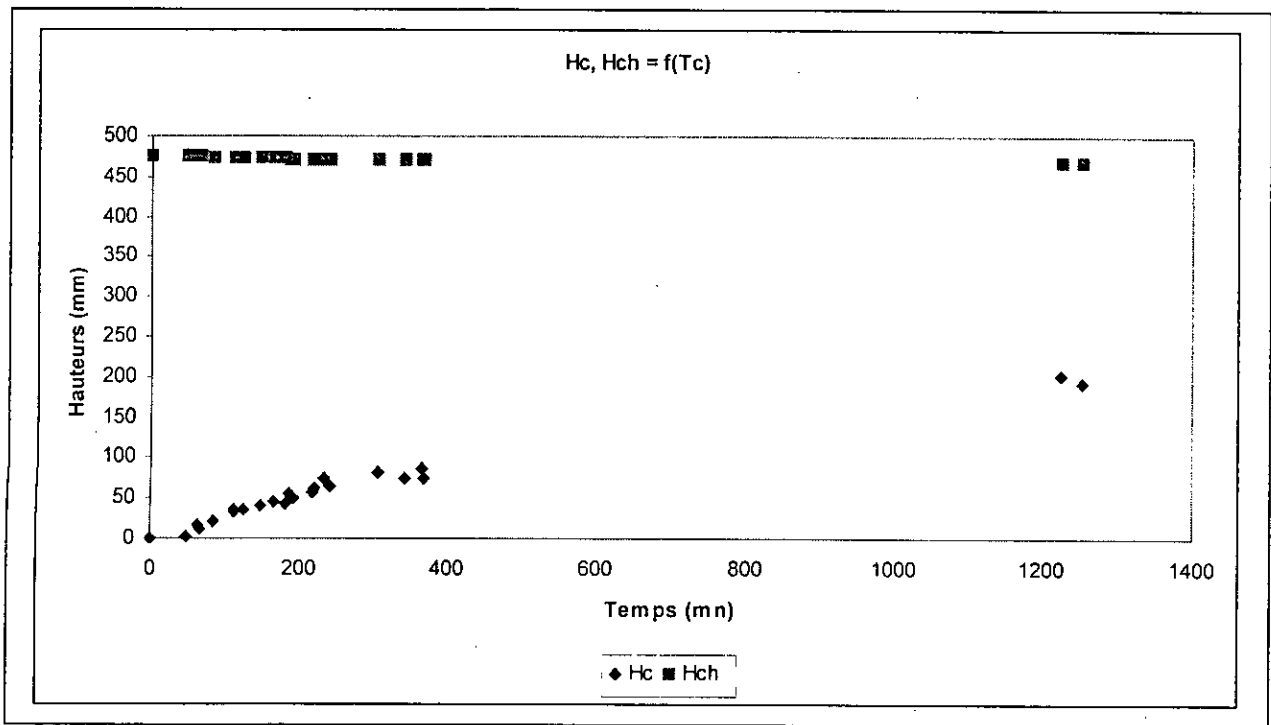




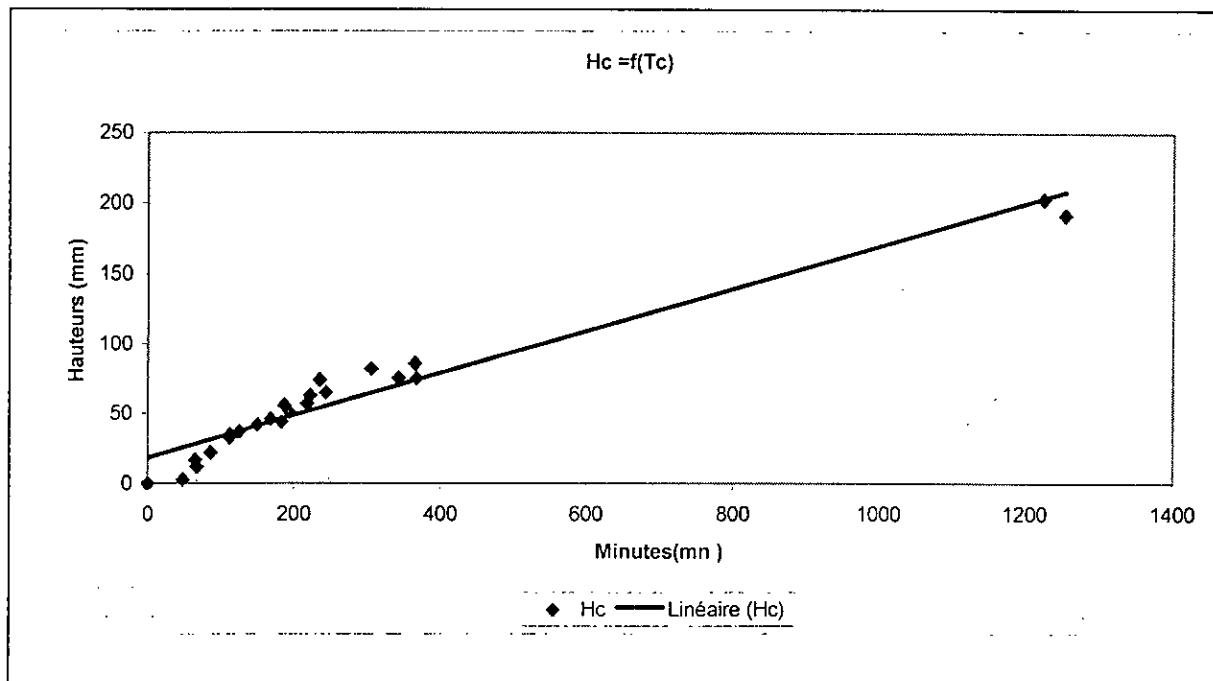
Graphe V.3. Evolution de Hc, Hch en fonction du temps pour  $c=6g/l$



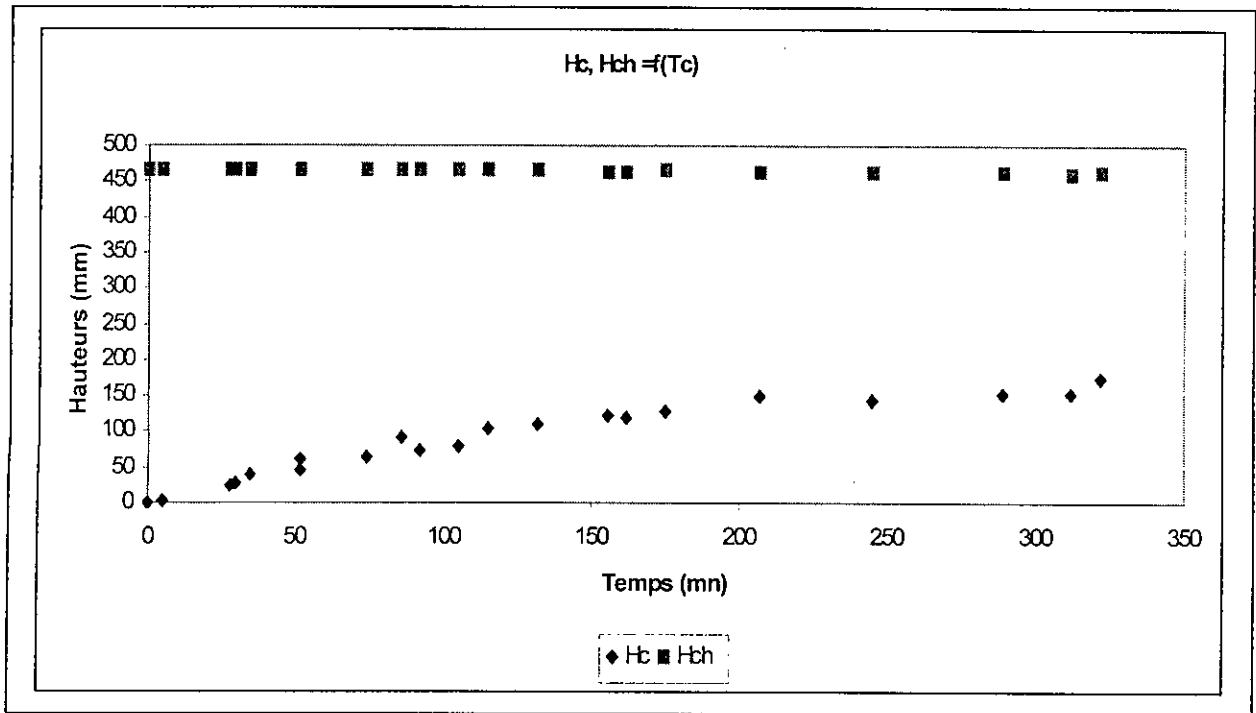
Graphe V.4. Evolution de Hc en fonction du temps pour  $c=6g/l$



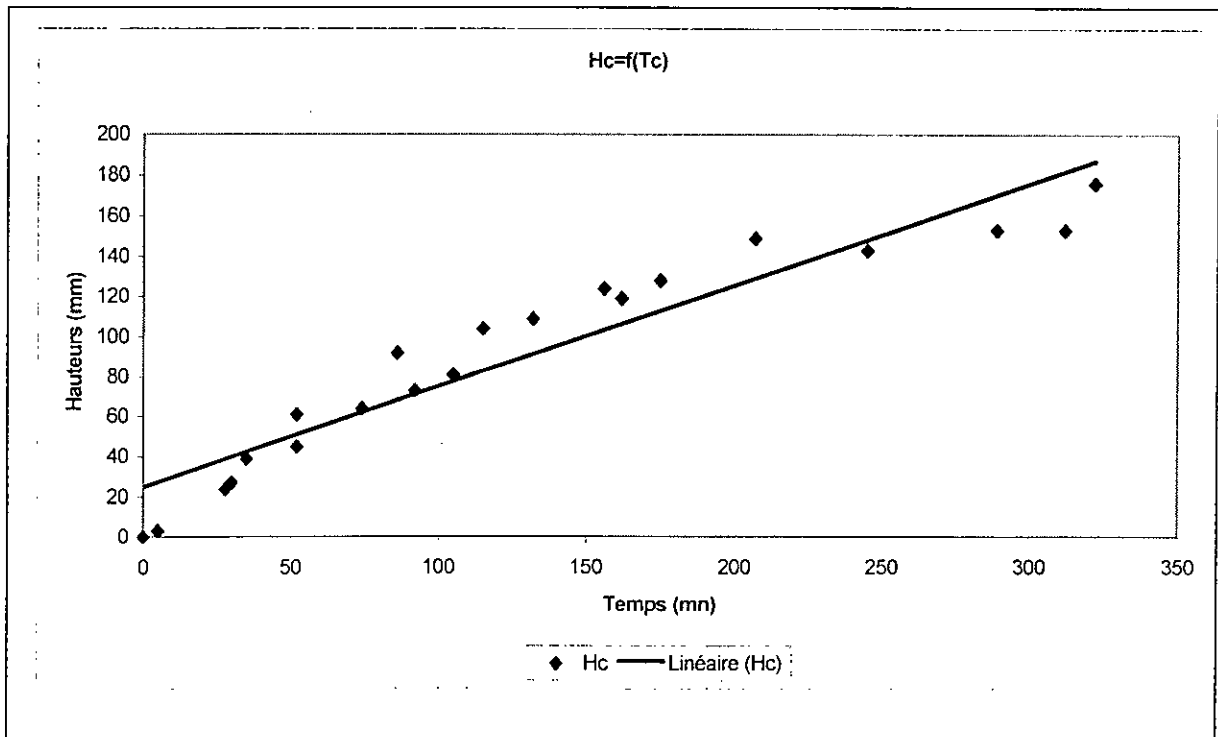
Graph V.5. Evolution de  $H_c, H_{ch}$  en fonction du temps pour  $c=10g/l$



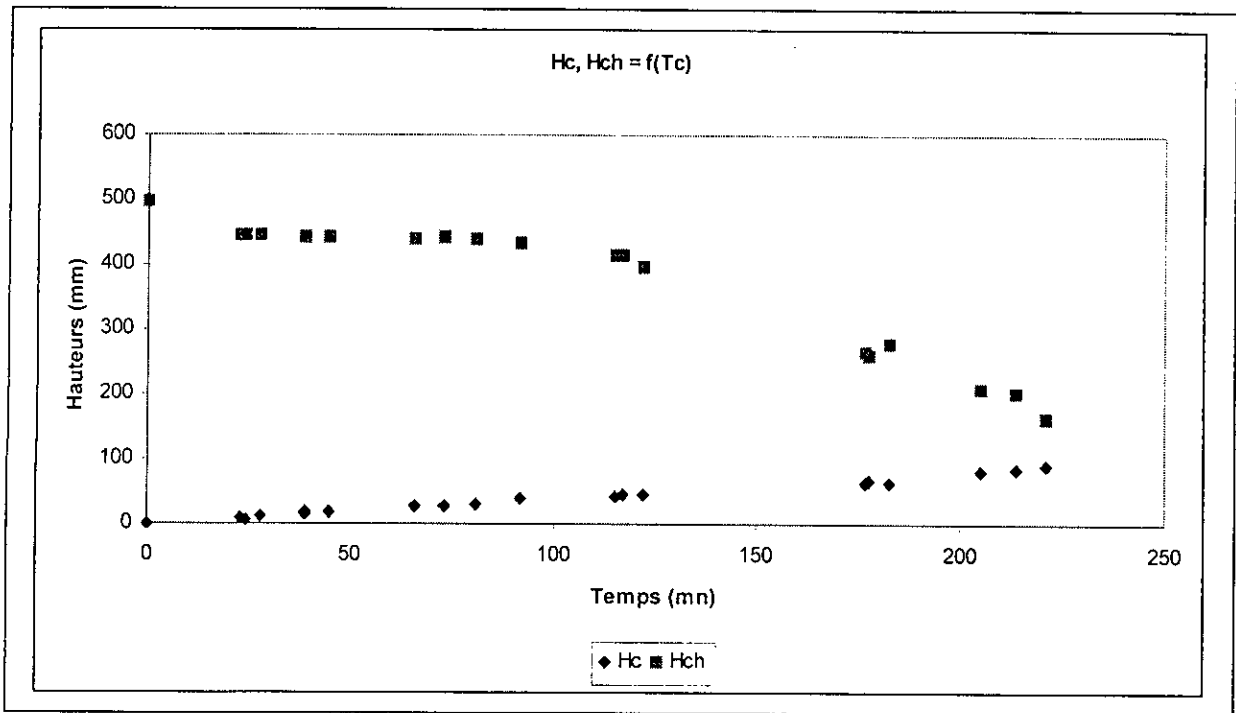
Graph V.6. Evolution de  $H_c$  en fonction du temps pour  $c=10g/l$



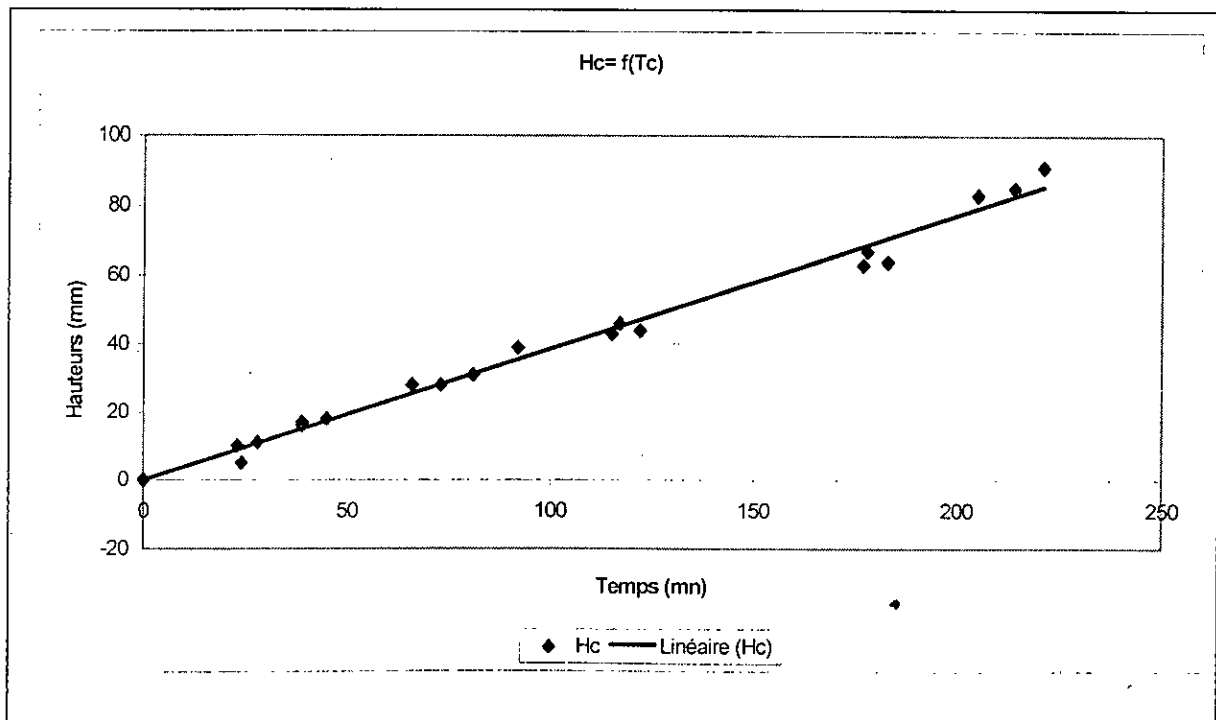
Graphe V.7. Evolution de H<sub>c</sub>, H<sub>ch</sub> en fonction du temps pour c= 20g/l



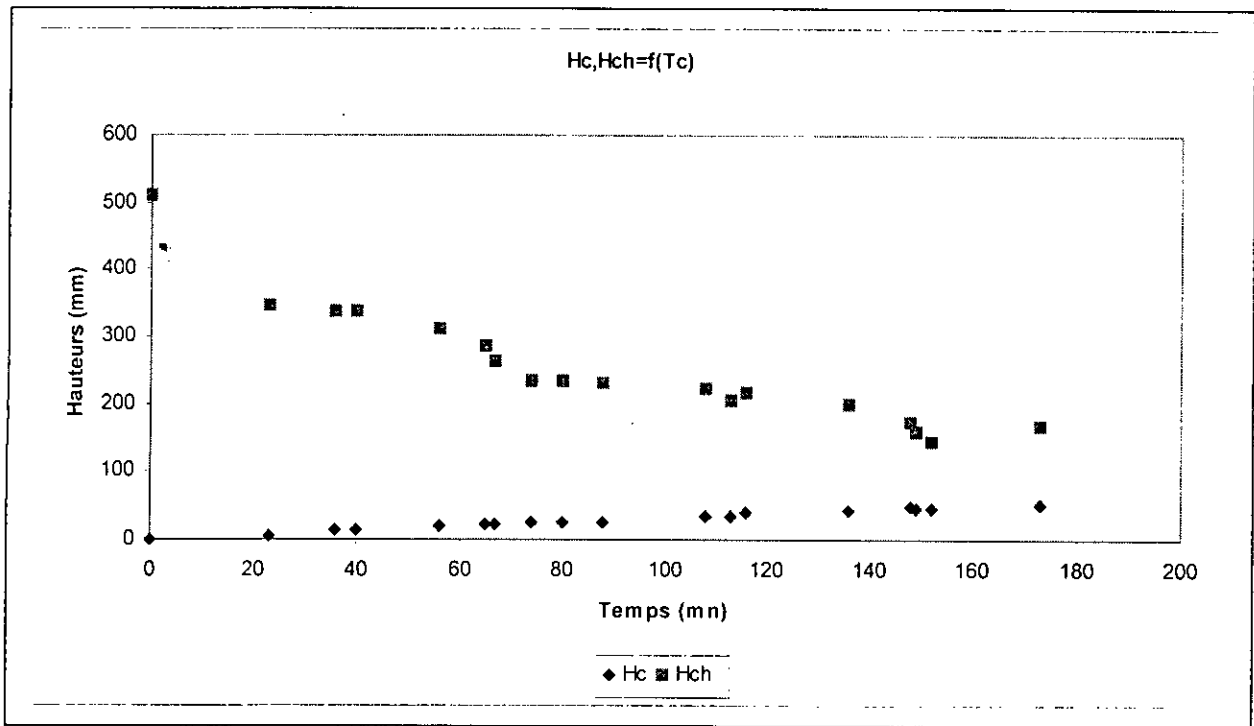
Graphe V.8. Evolution de H<sub>c</sub> en fonction du temps pour c= 20g/l



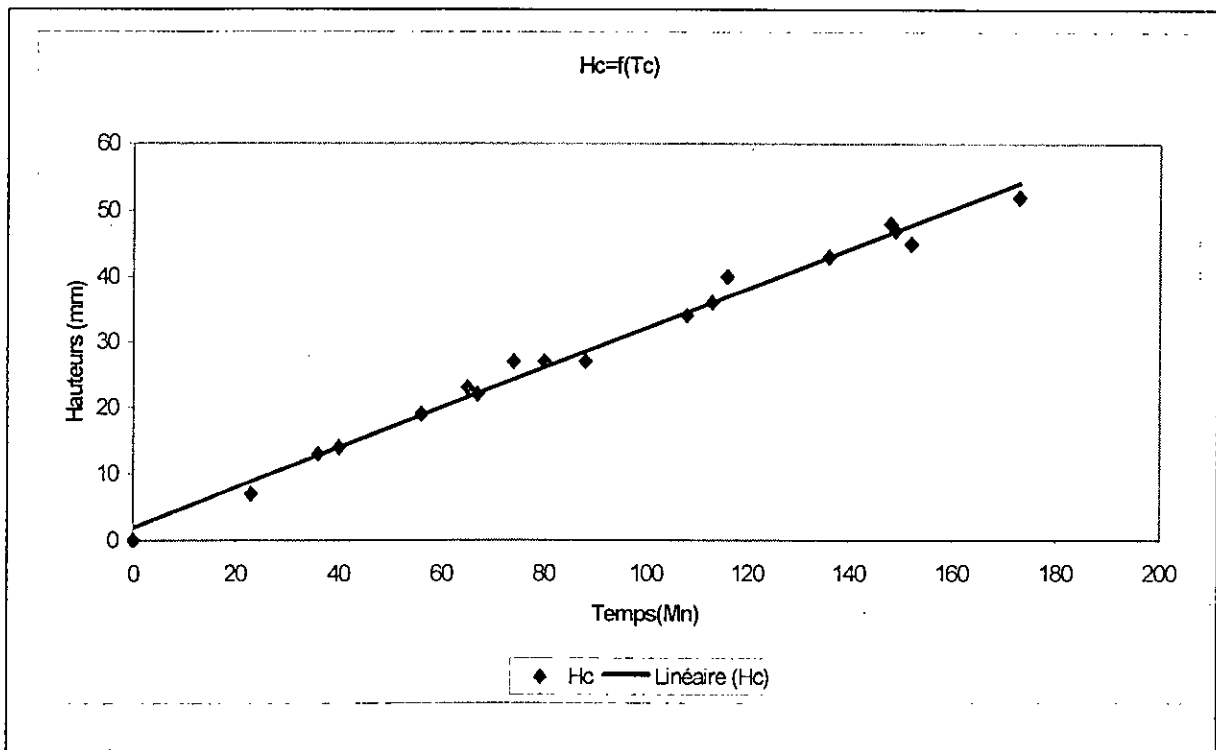
Graph V.9. Evolution de Hc, Hch en fonction du temps pour  $c = 50\text{g/l}$



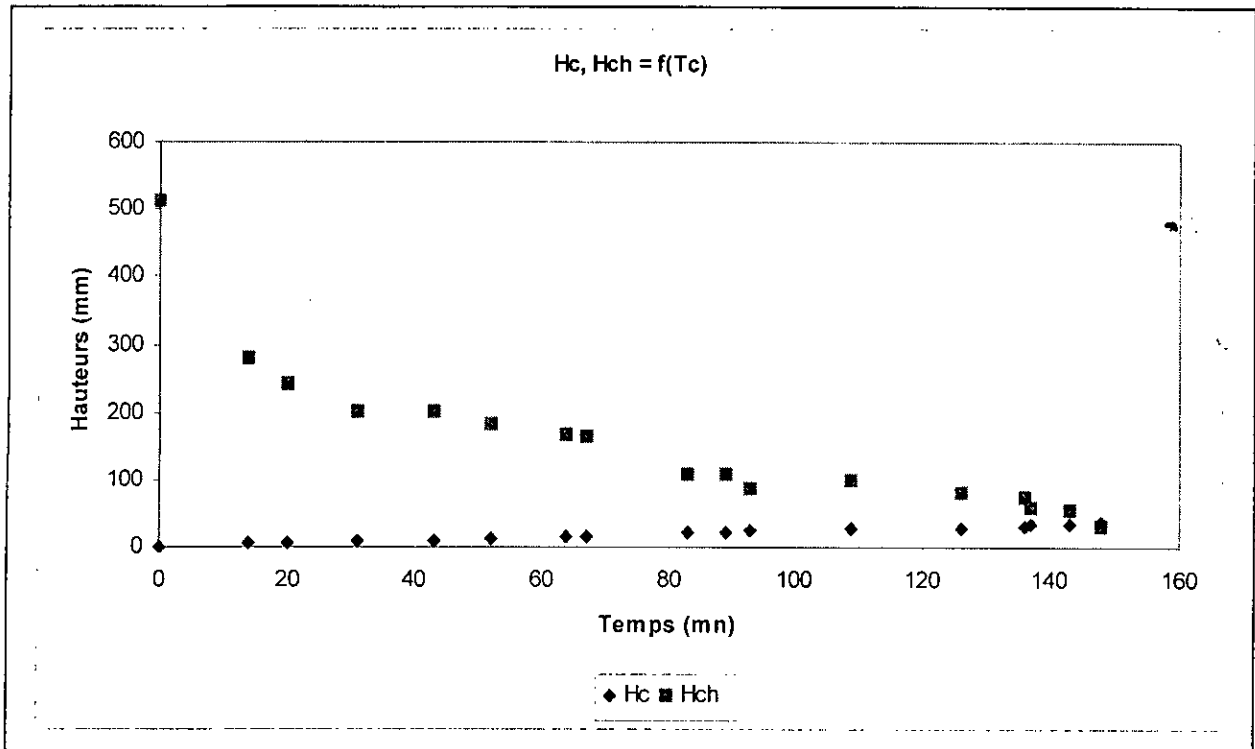
Graph V.10. Evolution de Hc, en fonction du temps pour  $c = 50\text{g/l}$



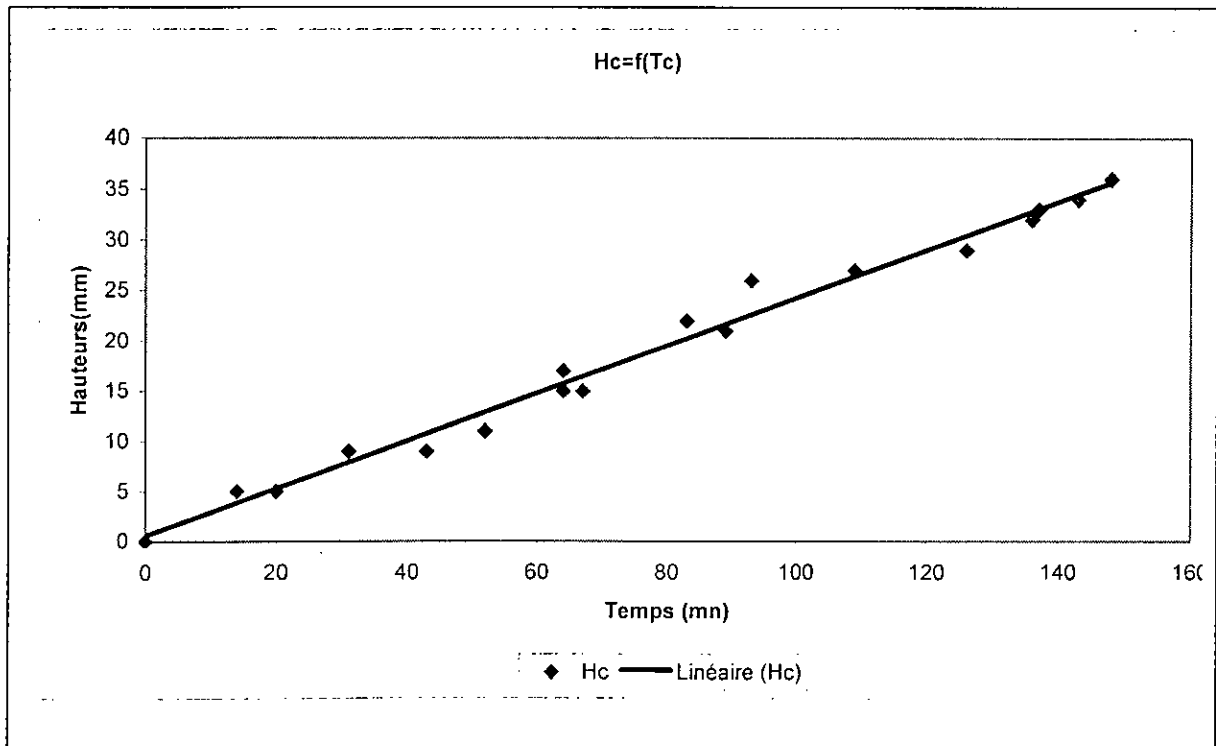
Graphe V.11. Evolution de Hc, Hch en fonction du temps pour  $c = 100\text{g/l}$



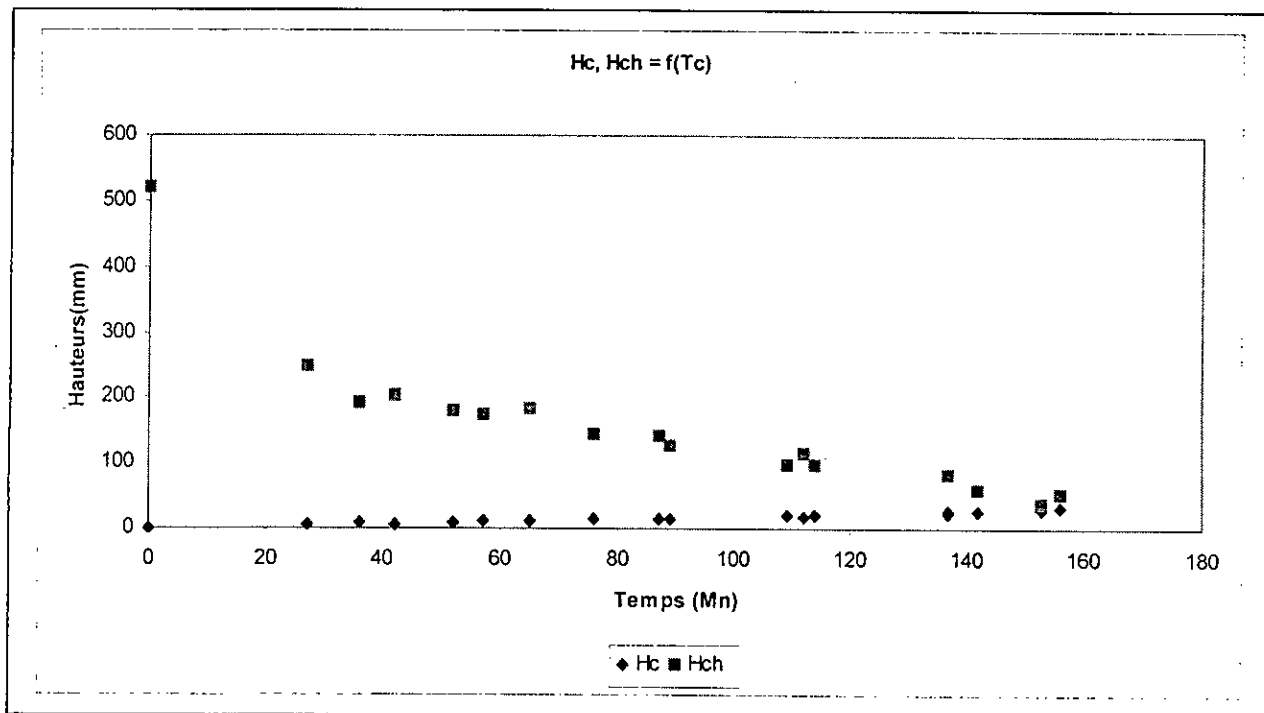
Graphe V.12. Evolution de Hc, en fonction du temps pour  $c = 100\text{g/l}$



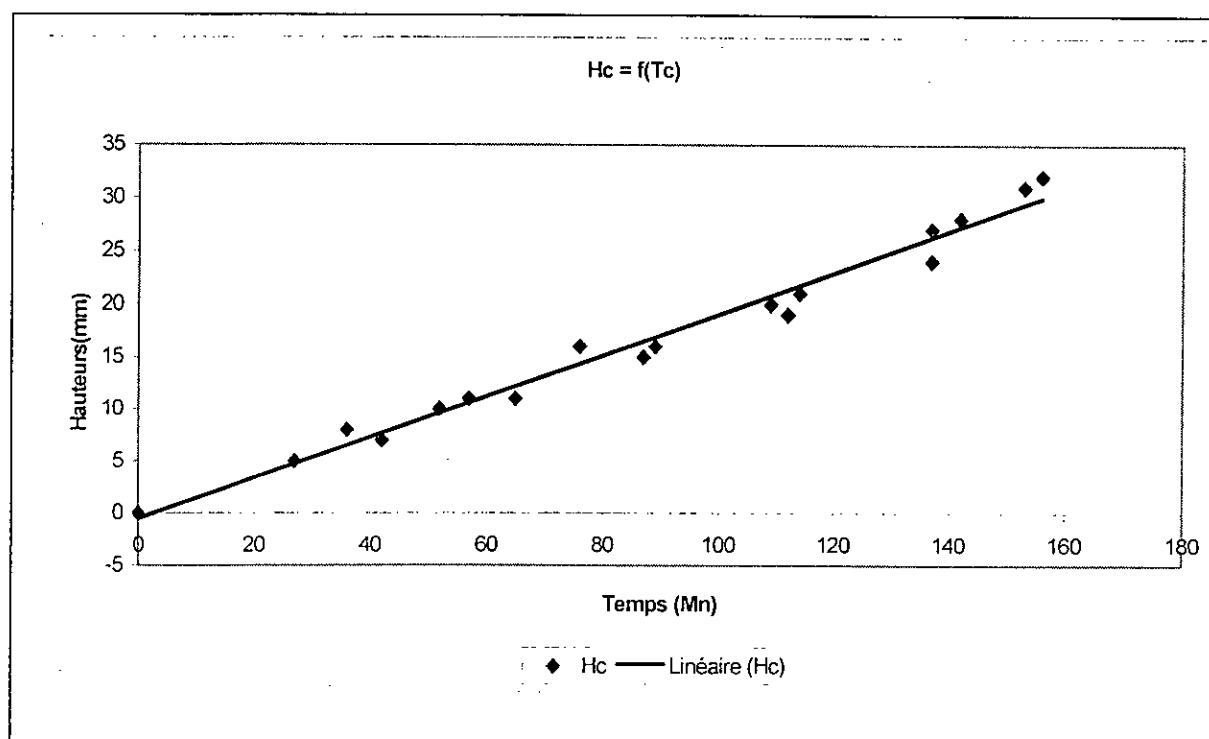
Graph V.13. Evolution de  $H_c, H_{ch}$  en fonction du temps pour  $c=150g/l$



Graph V.14. Evolution de  $H_c$ , en fonction du temps pour  $c=150g/l$



Graph V.15. Evolution de Hc, Hch en fonction du temps pour  $c=200g/l$



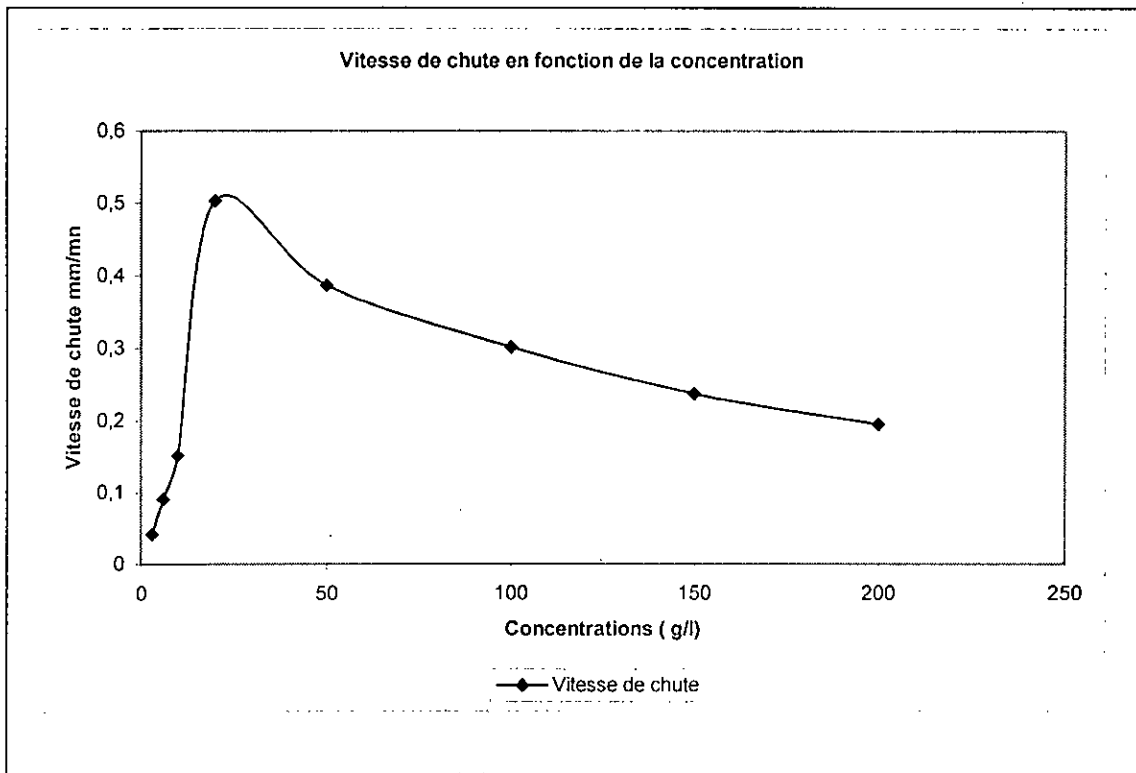
Graph V.16. Evolution de Hc, Hch en fonction du temps pour  $c=200g/l$

**Vitesse de chute en fonction de la concentration**

En utilisant les pentes du graphe  $H_c = f(T_c)$  ( hauteur de la zone de suspension), on aura pour chaque concentration la vitesse de chute  $V_c$ , les résultats sont présentés sur le tableau 5.1.

Concentration G/l	3	6	10	20	50	100	150	200
Vitesse moyenne	0,0418	0,0911	0,1516	0,5032	0,3871	0,3019	0,2372	0,1953

L'évolution de la vitesse de chute en fonction de la concentration est ainsi représentée sur le graphe suivant:



**Graphe V.17 : Evolution de la vitesse de chute en fonction de la concentration**



Dans cette première série d'essai sur la sédimentation des matières en suspension dans une eau calmes on a remarqué que :

Pour le 1<sup>er</sup> palier qui représente les faibles concentrations :

La zone claire (Hc) se fait après un temps supérieur à celui de la zone de dépôt. Ceci s'explique par le faible effet de la floculation dû à la répartition dispersée des éléments péltiques .

Pour le 2<sup>eme</sup> palier qui représente les moyennes concentrations

Dans ce palier l'intervalle de temps entre l'apparition des deux zones (clarification et dépôt), est moins long que le premier vue l'augmentation de la concentration et par la suite la floculation.

Et pour le 3<sup>eme</sup> palier des fortes concentrations :

On a remarqué que malgré la forte concentration, le dépôt est supérieur à la zone de clarification. Ceci est dû à l'évacuation des eaux interstitielles par un flux liquide dirigé vers le haut , et un autre flux solide dirigé au sens contraire(du haut vers le bas).

Ainsi, la vitesse de chute est proportionnelle à la concentration pour des faibles concentrations en matières en suspension jusqu'à atteindre un **d'un seuil critique** (entre 15 et 20 g/l ) , ou elle prend des valeurs maximales , en suite elle tend à diminuer progressivement en fonction de la teneur en sédiments secs.

Cette diminution de la vitesse de chute est dû dans une première appréciation au dépôt de sédiments qui est plus rapide que la hauteur de la frange décantée au sommet du tube et à la présence d'un flux solide ( pour les forte concentration) qui se dirige vers le haut et empêche ainsi les particules à se décanter rapidement.

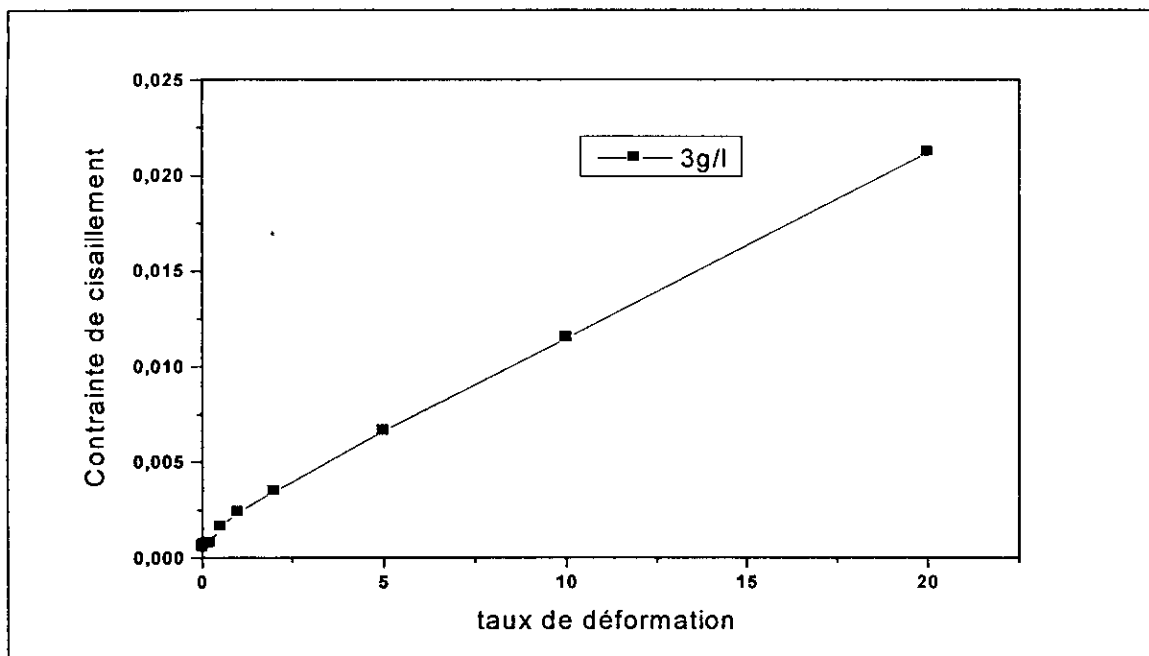
Donc on peut dire que : En suspension moins concentrée, la vitesse de sédimentation des agrégats se rapproche de celle des particules élémentaires. Elle croît avec la concentration tant que celle-ci est inférieure à environ 18 g/l. Ensuite elle diminue, on parle alors de vitesse de sédimentation **entravée**, les agrégats se gênent mutuellement dans leur chute. En effet, le mouvement descendant des agrégats est compensé par un mouvement ascendant de fluide qui exerce des forces de frottement sur les agrégats. Si la concentration est très importante, les forces de frottement

générées par le fluide ascendant équilibrent la force de gravité, conduisant à un état d'équilibre dynamique vertical des agrégats. Cet état apparaît à proximité du fond et est appelé vase fluidisée.

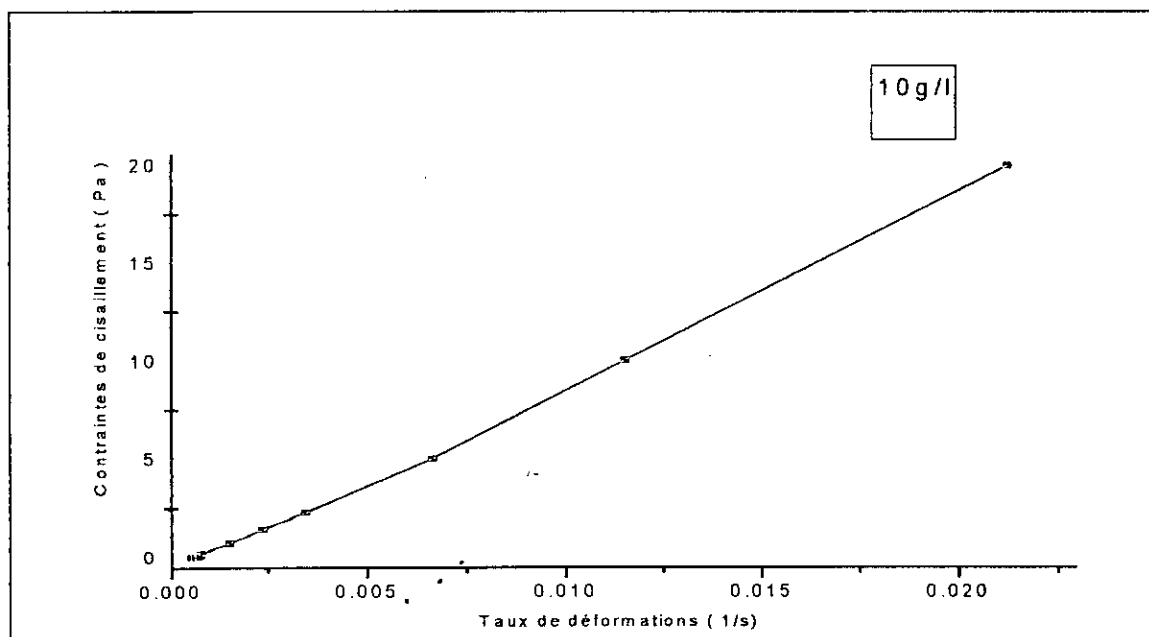
**V.2. MESURES RHEOLOGIQUES :**

Les graphes V.18 – V.25 donnent la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour les différentes concentrations.

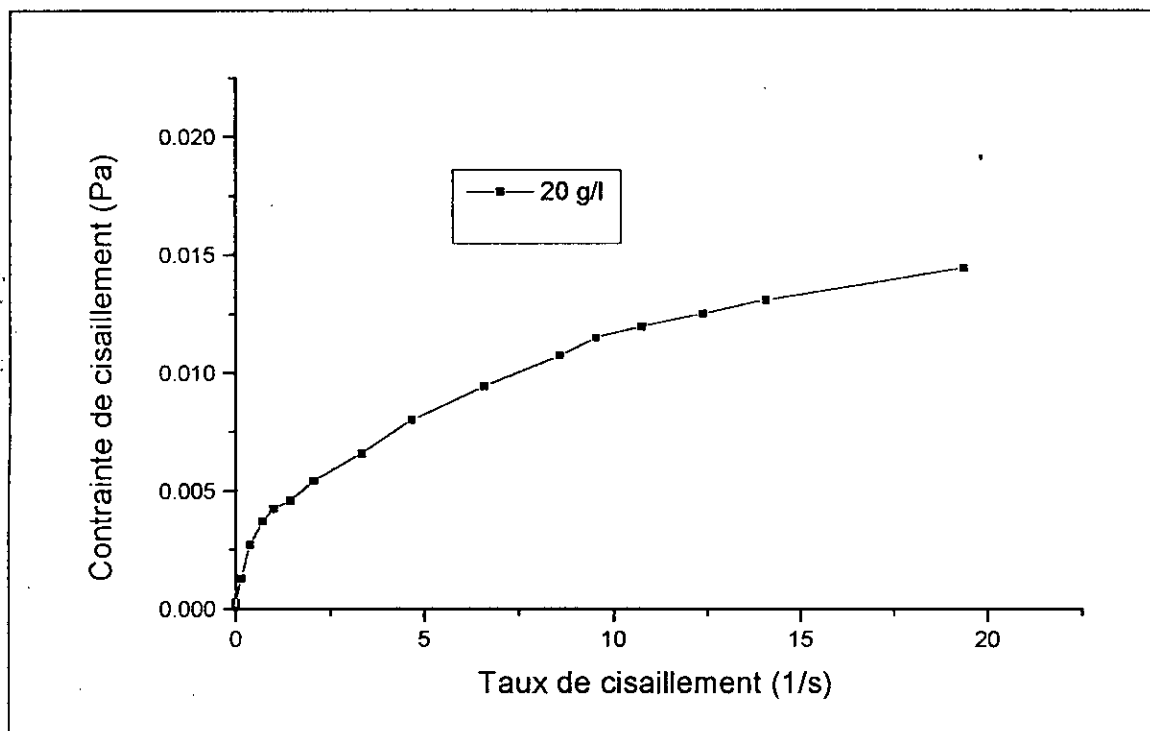
◆ **Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement**



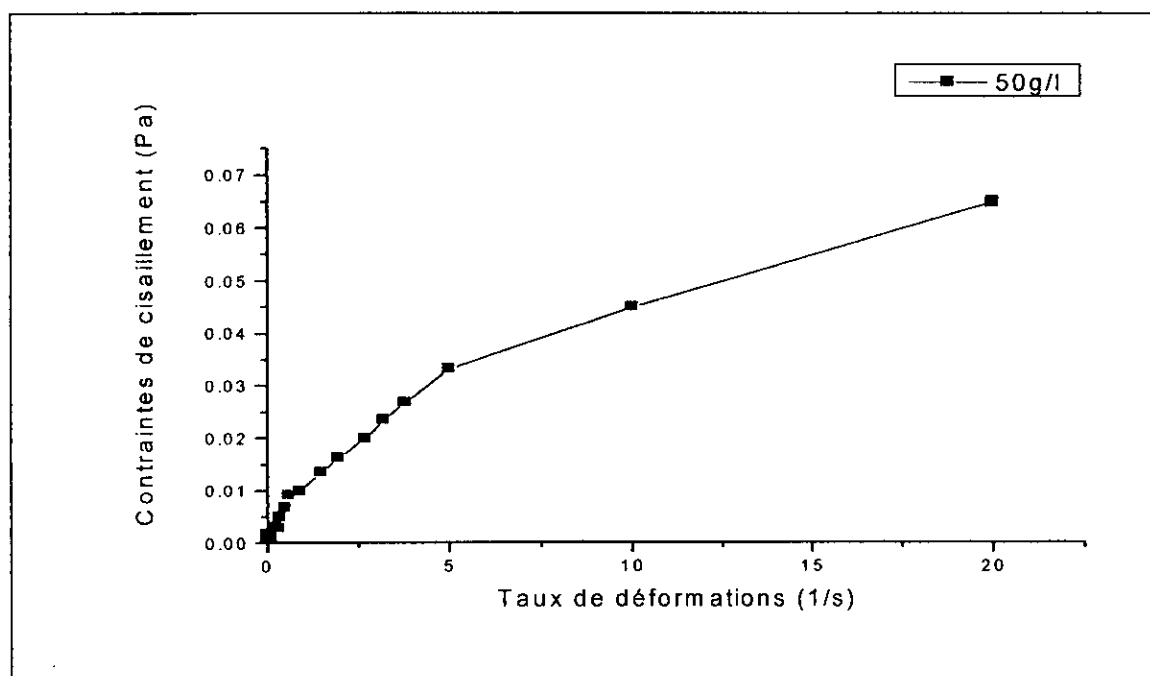
Graph V. 18: Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement (c = 3g/l)



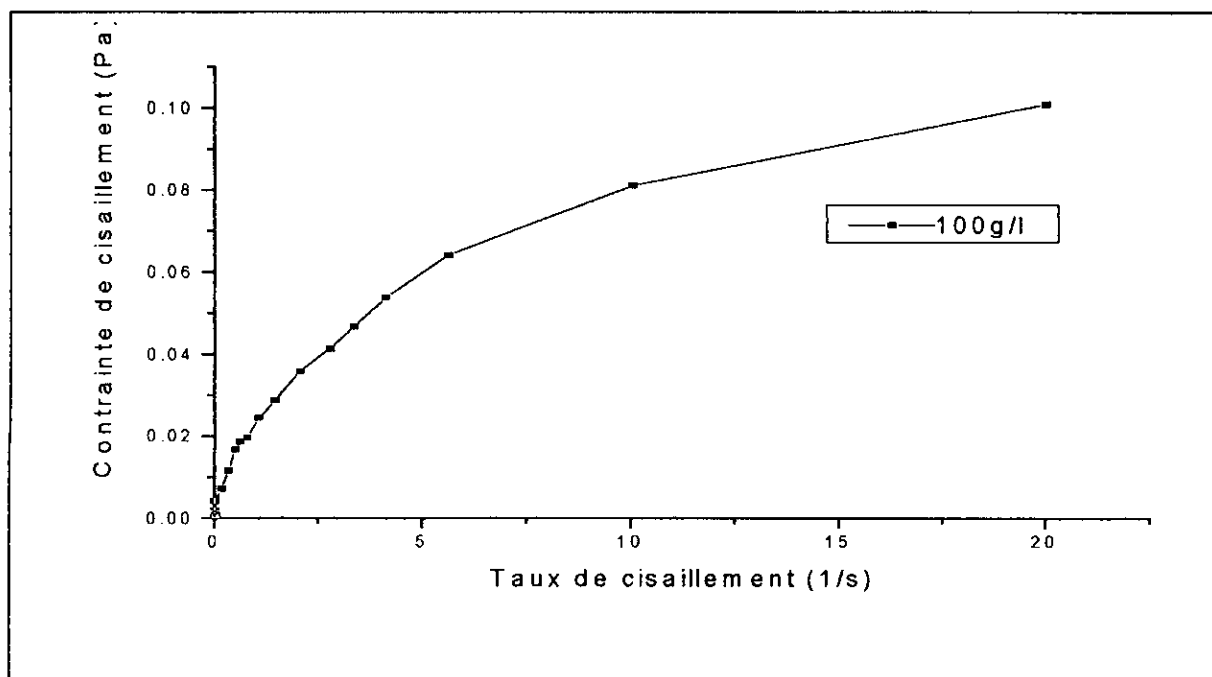
Graph V. 19: Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement (c = 10g/l)



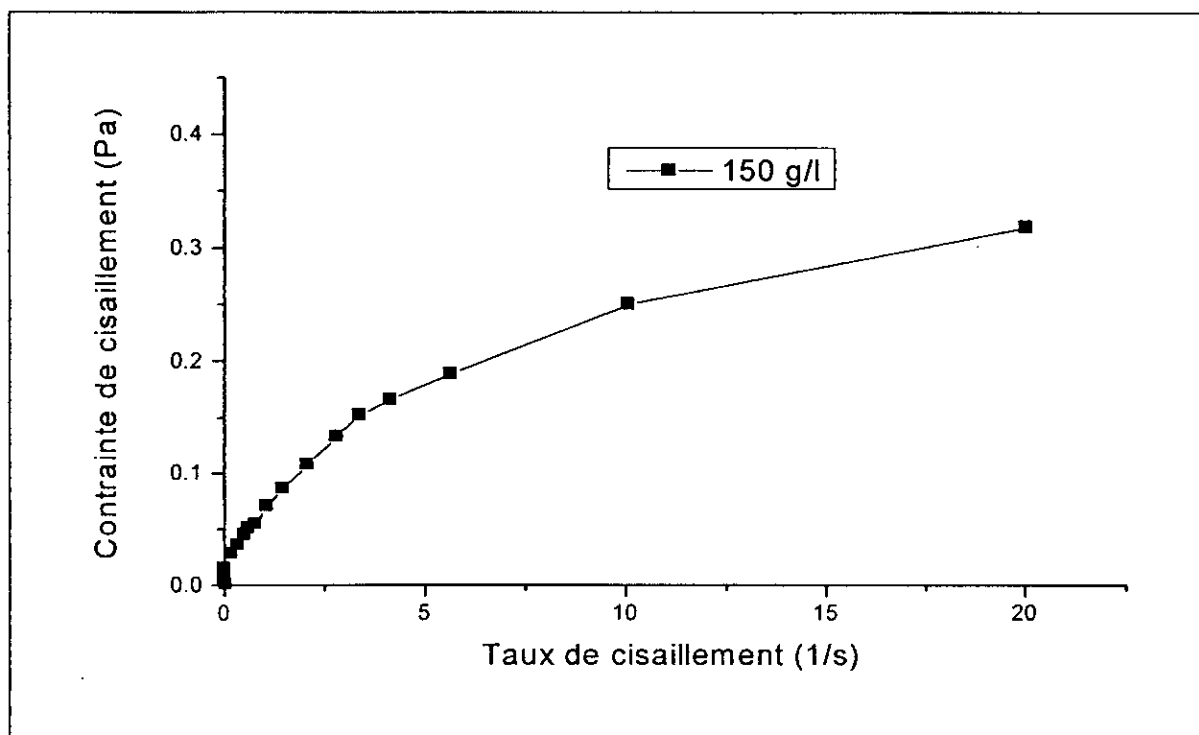
Graphe V.20 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement (c = 20g/l)



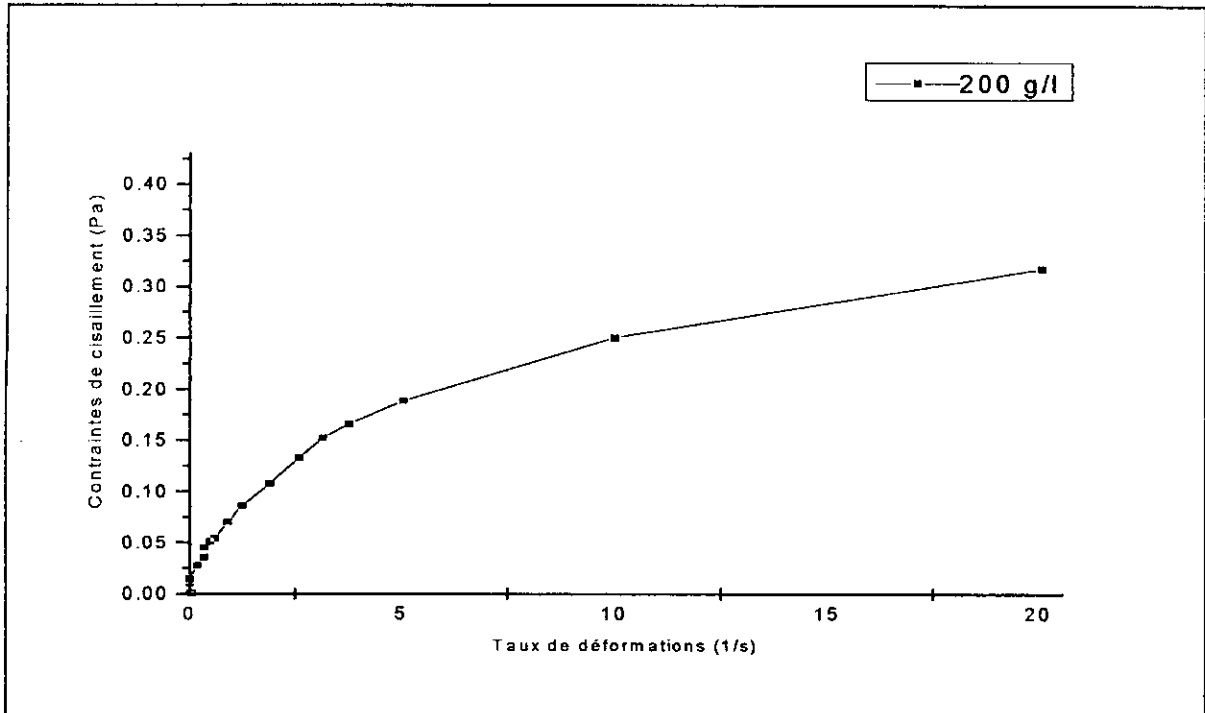
Graphe V.21 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement (c = 50g/l)



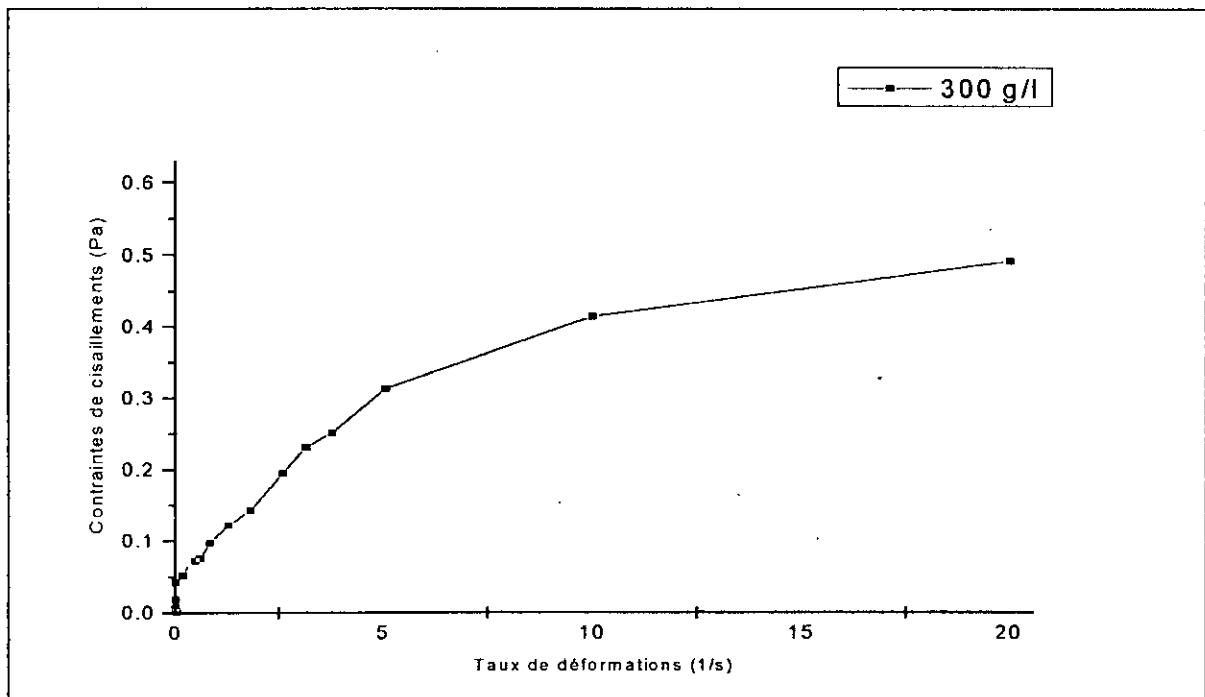
Graphe V.22 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ( $c = 100\text{g/l}$ )



Graphe V.23 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ( $c = 150\text{g/l}$ )



Graph V.24 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement (c = 200g/l)

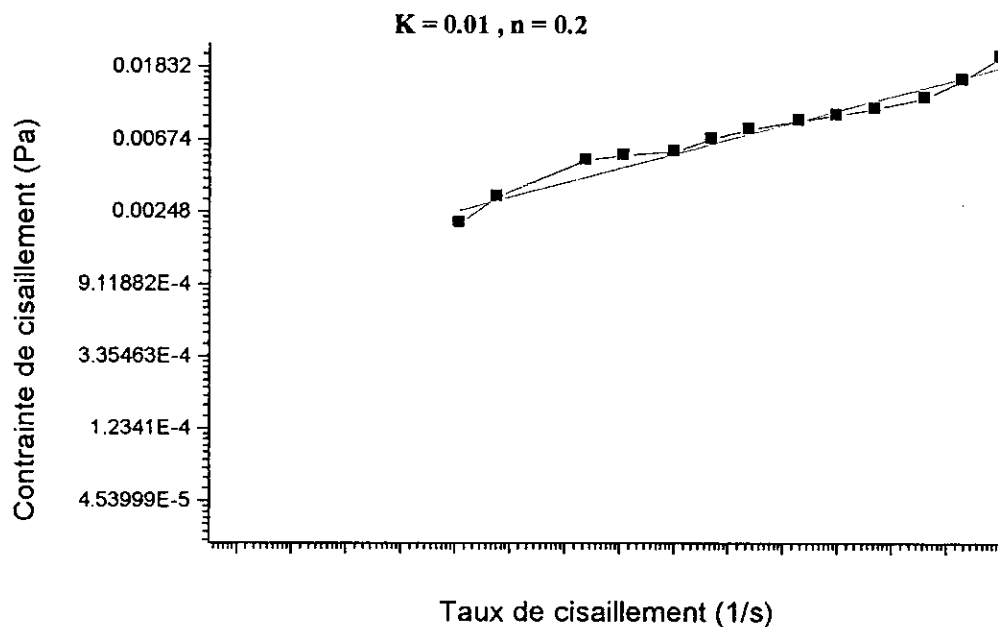


Graph V.25 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement (c = 300g/l)

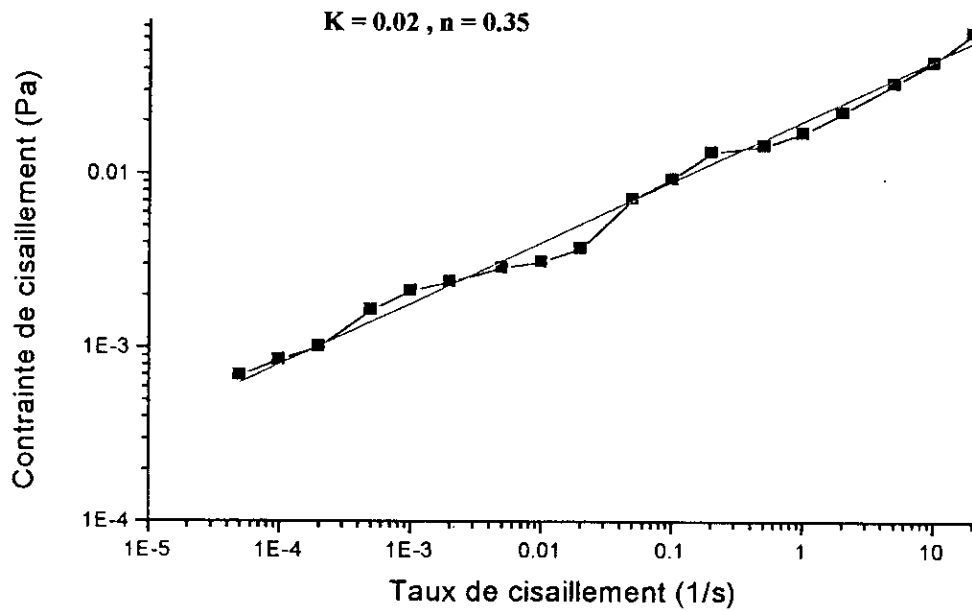
A travers cette série de graphes, la seule remarque qu'on peut donner c'est qu'en comparant l'allure de ces courbes avec les courbes des différents comportements rhéologiques, on peut dire que la vase en suspension de l'eau se comporte comme un fluide Newtonien pour les faibles concentration (la viscosité sera déduite ainsi en déterminant la pente de la courbe). A partir de 20 g/l de concentration, on voit que le comportement tant vers celui du fluide de Pseudoplastique, la viscosité n'est ainsi plus constante mais varie en fonction du taux de cisaillement.

En traçant la variation du taux de cisaillement en fonction du taux de déformation à l'échelle logarithmique, on peut interpoler une loi de comportement qui suit le modèle suivant :

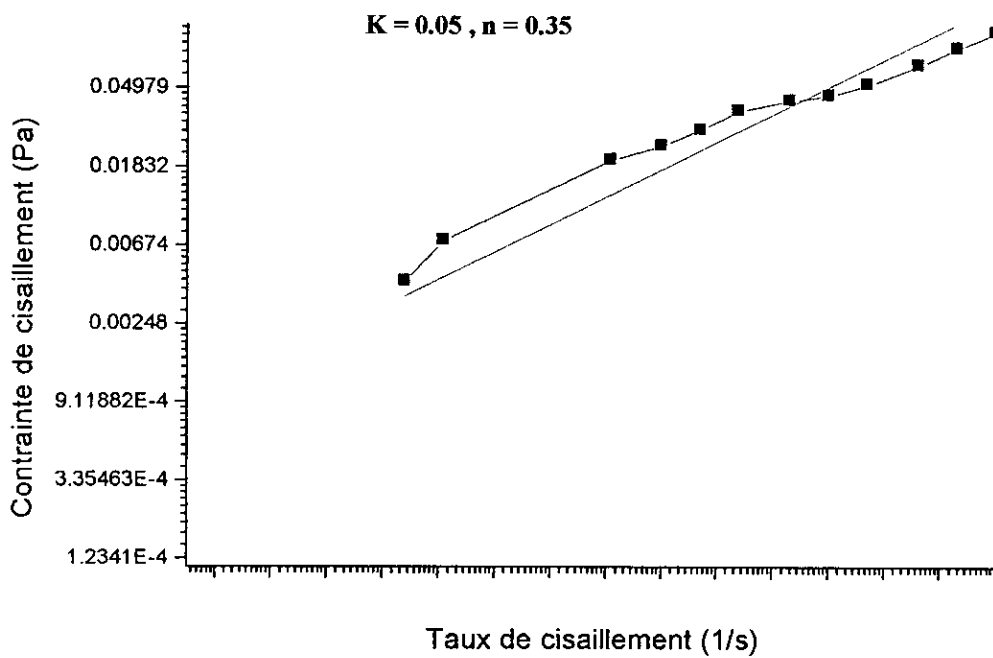
$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n , \text{ ou } K, n \text{ des constantes.}$$



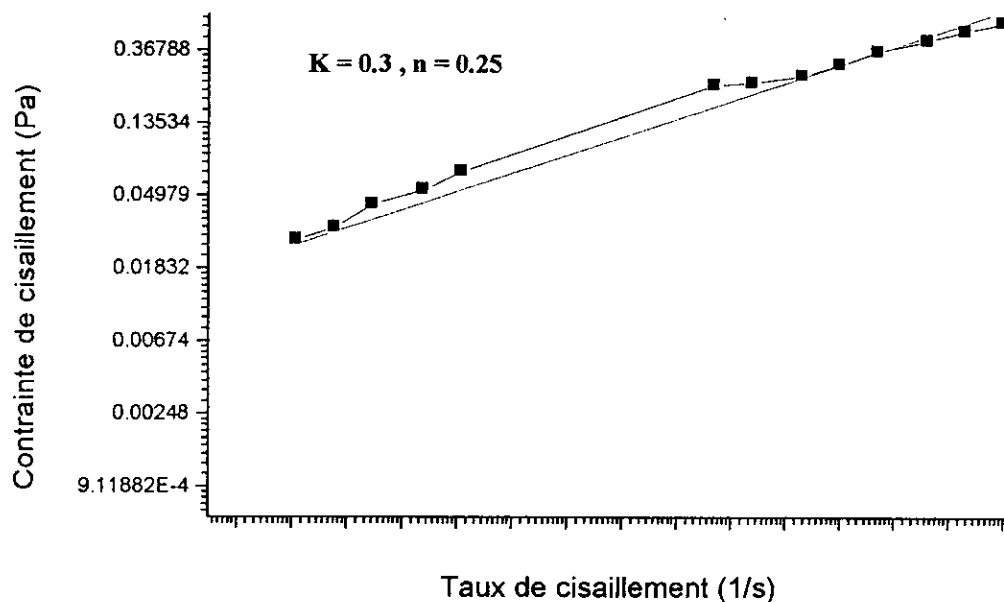
Graphe V.26 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement (en log log ), concentration 20 g/l



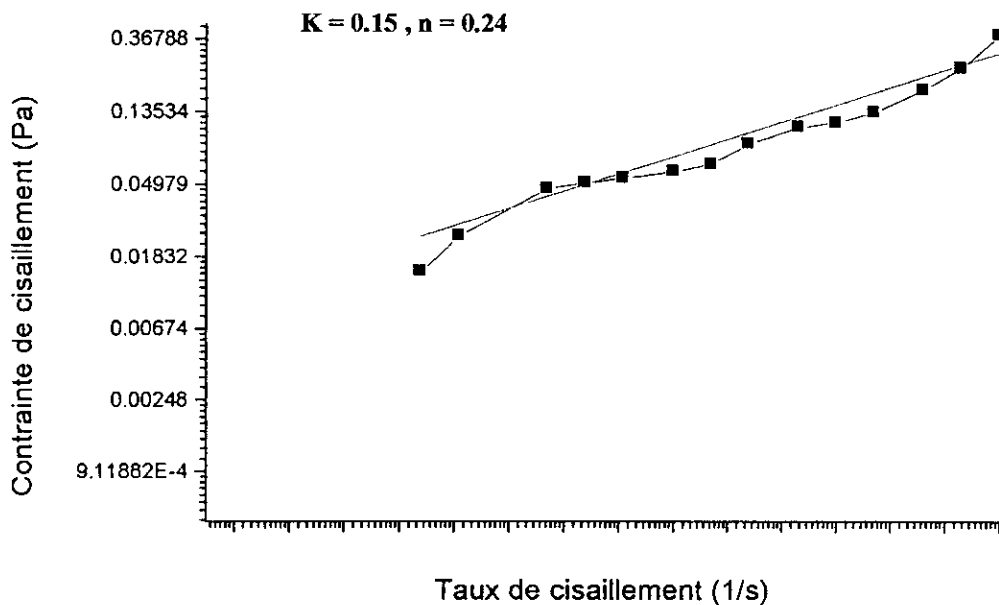
Graphe V.27 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ( en log log ), concentration 50 g/l



Graphe V.28 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ( en log log ), concentration 100 g/l



Graph V.29 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ( en log log ), concentration 150 g/l



Graph V.30 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ( en log log ), concentration 200 g/l

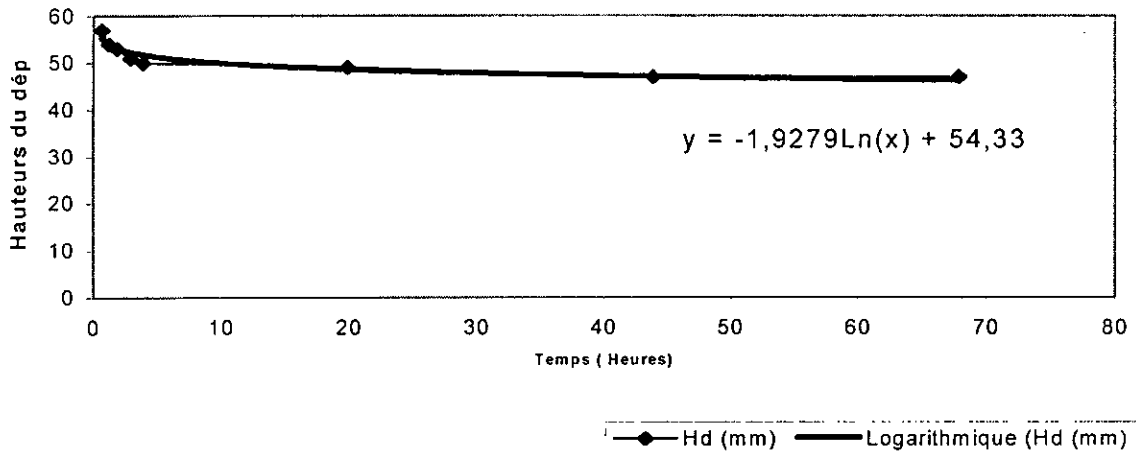


L'étude du comportement rhéologique de la vase nous a permis de relier la variation de la vitesse de chute en fonction de la concentration. Nous avons remarqué qu'à travers les essais sur la vitesse de chute, que cette dernière tend à diminuer à partir d'une concentration de 20 g/l, et qu'à partir de la même concentration que la suspension change de comportement d'un fluide newtonien à un fluide pseudo – plastique.

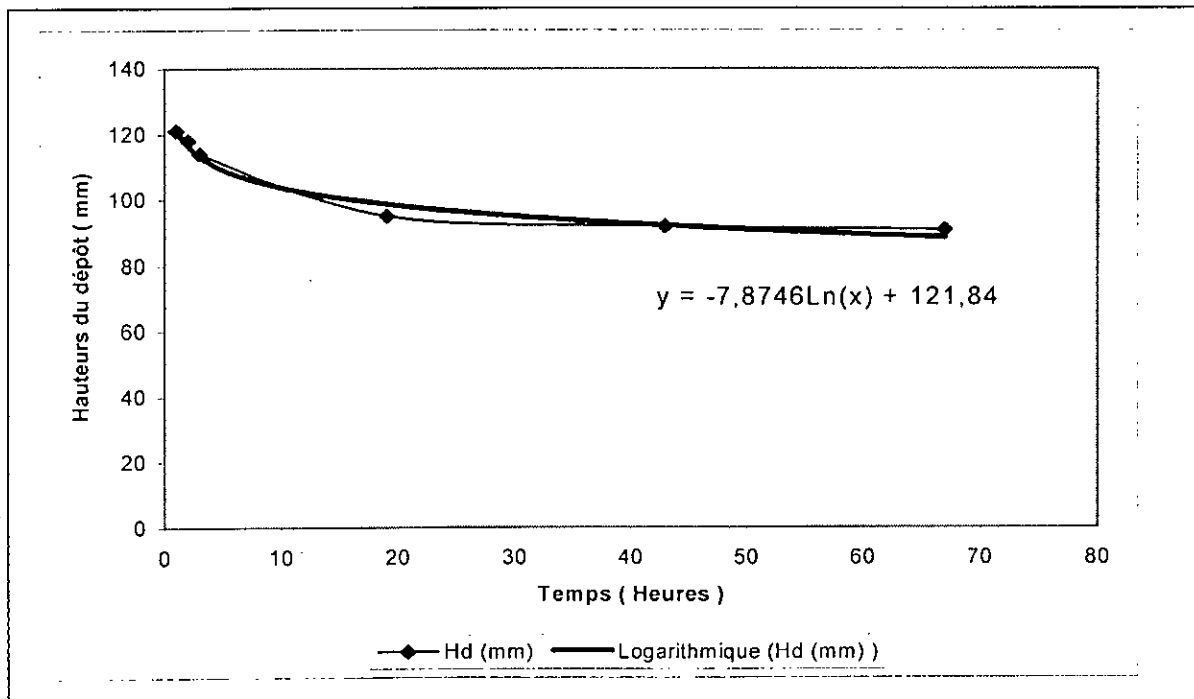
En augmentant la concentration, la vitesse de chute tend à diminuer, elle reste constante à une grande concentration. De même que la contrainte visqueuse qui devient importante d'où l'augmentation de la viscosité et réduction du mouvement des particules les unes par rapport aux autres ( Mouvements brownien nul ).

### V.3. ETUDE DES TASSEMENTS

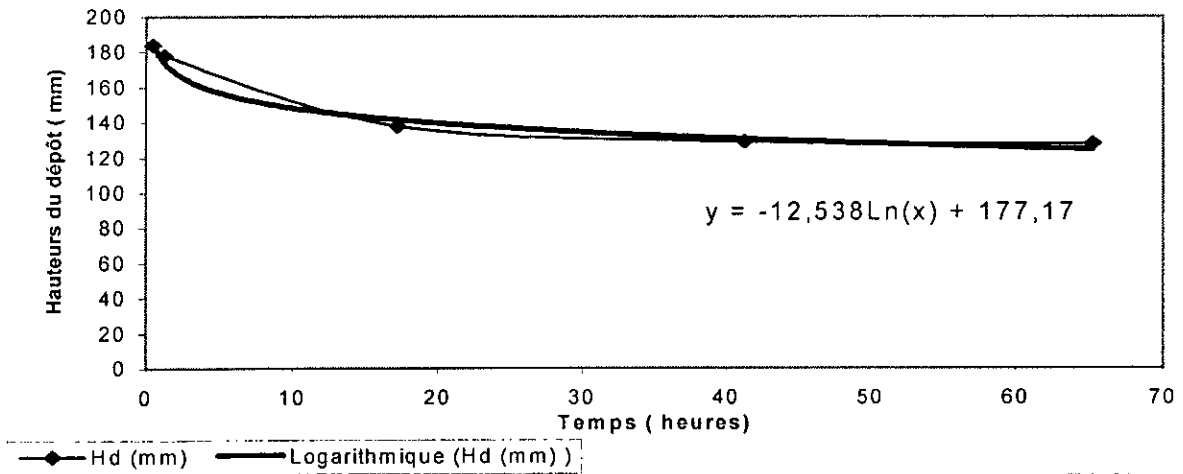
Les études sur les tassements ont été faite seulement pour les fortes concentrations, les résultats sont présentés sur cette série de graphe



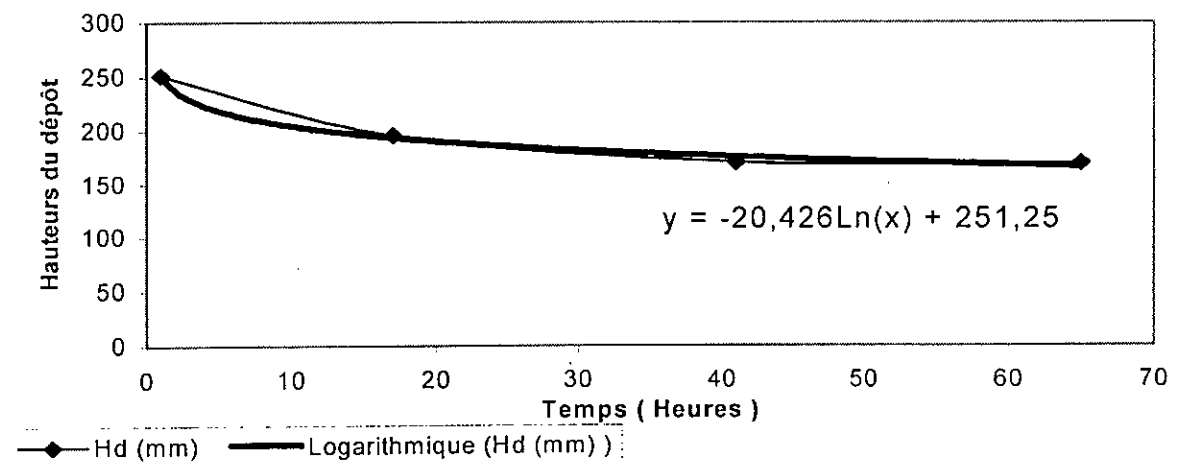
Graphe V.31 : Evolution du tassement en fonction du temps c=50 g/l



Graphe V.32 : Evolution du tassement en fonction du temps C =100 g/l



Graph V.33 : Evolution du tassement en fonction du temps C= 150 g/l



Graph V.34 : Evolution du tassement en fonction du temps C= 200 g/l

Ces essais sur les tassements nous ont permis de vérifier expérimentalement la loi des tassements qu'on a déjà présenté dans le chapitre II,

A partir des courbes expérimentales, on remarque que l'évolution du tassement en fonction du temps répond à l'expression suivante :  $H_d = -\alpha + \beta \ln t$

$H_d$  : étant la hauteur du dépôt.

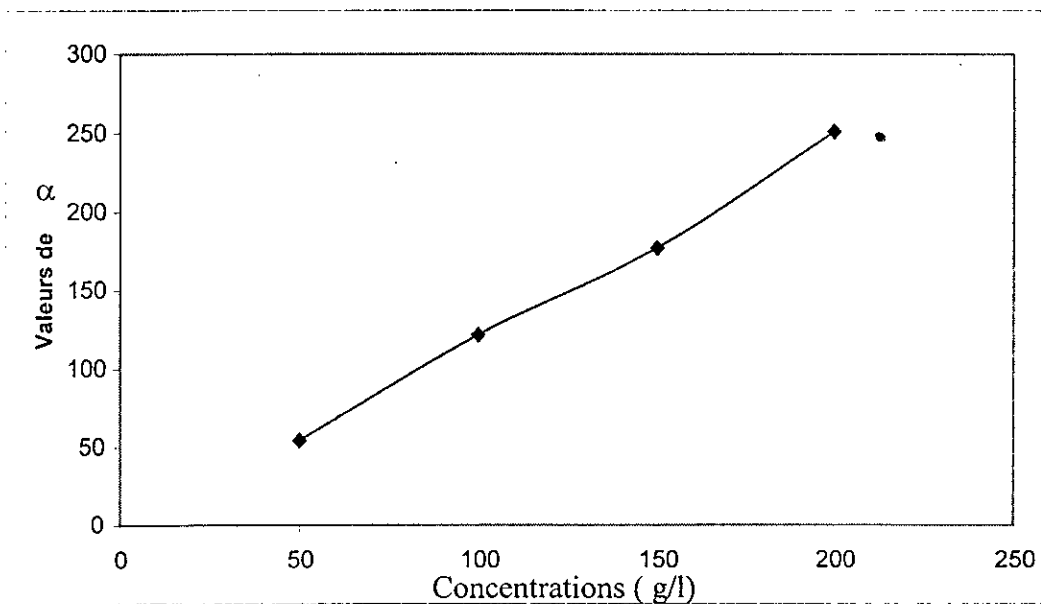
$T$  : le temps du tassement.

$\alpha, \beta$  : des constantes.

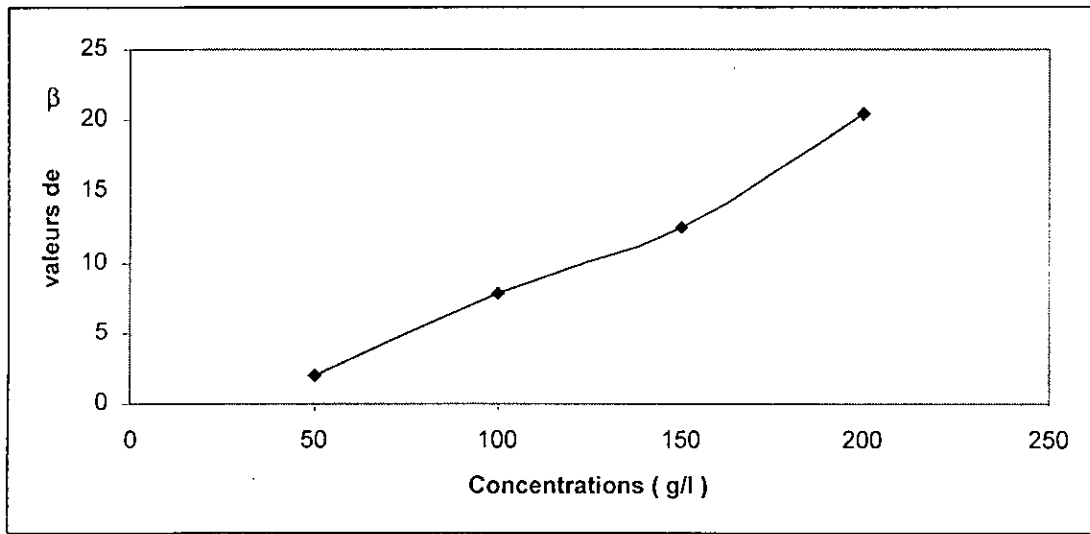
Les valeurs de  $\alpha, \beta$ , sont ainsi déterminées à partir des résultats expérimentaux :

Concentrations	50 g/l	100 g/l	150 g/l	200 g/l
$\alpha$	54.33	121.84	177.17	251.25
$\beta$	1.9279	7.8746	12.538	20.426

La variation de  $\alpha, \beta$  en fonction de la concentration sera ainsi représenté comme suit:



Graphe V.35 : Evolution de  $\alpha$  en fonction de la concentration



Graphe V.36 : Evolution de  $\beta$  en fonction de la concentration

Nous avons remarqué que les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  varient linéairement en fonction de la concentration.

---

# Conclusion

---

## CONCLUSION

L'envasement des barrages qui pose de sérieux problèmes aux gestionnaires de l'eau, s'effectue essentiellement par l'apport solide constitué de particules fines maintenues en suspension.

Ce mélange (sol eau) qui a un comportement très variable dans l'espace et dans le temps, nécessite des études très précises pour connaître ses différentes caractéristiques hydrodynamiques, et pour se faire une idée précise sur le comportement des éléments péloïdiques de ce mélange.

Cela nous conduit à affirmer que la proposition des conditions d'utilisation des différents moyens de lutte contre l'envasement doit se baser sur cette étude poussée de ces matières en suspension et leurs comportements hydrodynamiques et rhéologiques dans un milieu aqueux.

Le comportement rhéologique des matières en suspension est complexe, et fait intervenir deux phénomènes : la turbulence caractérisée par le flux de transport des matières inversement proportionnel au gradient de la concentration (phénomène d'homogénéisation), et le phénomène gravitaire lié à la vitesse de chute et ayant tendance à augmenter la concentration vers le bas. La juste exposition de ces phénomènes a permis d'élaborer l'équation de la suspension dont l'intégration suppose la vitesse de chute constante. Cette hypothèse mise à défaut par plusieurs auteurs est confirmée par notre étude expérimentale. En effet, nous avons démontré que cette vitesse de chute varie en fonction de la concentration et a une grande influence sur le comportement rhéologique des mixtures (sol - eau). Nous avons établie cette relation en étudiant la variation de la viscosité dynamique en fonction de la concentration. Deux zones apparaissent, à faible concentration, la mixture se comporte comme un fluide newtonien, par contre pour les fortes concentrations, elle tend vers un comportement pseudo-plastique.

Ces deux résultats importants, peuvent améliorer l'estimation de la contrainte de cisaillement et suivre ainsi le phénomène du tassement de la vase.

Les caractéristiques que nous avons étudié peuvent être rattachées, par la suite à la détermination d'autres paramètres tels que la concentration critique qui nous permet de soutirer le maximum de volume de vase avec une faible perte d'eau, la détermination des pentes d'équilibres qui se basent sur le taux de solidification ainsi que l'élaboration des modèles physiques ou mathématiques des mécanismes hydrodynamiques de l'évolution du delta de vase en tenant compte de la variation de la vitesse de chute ainsi que du comportement rhéologique. Nos résultats peuvent être également utilisés pour la détermination de la viscosité et la concentration optimale dans le cas du dragage mécanique.



## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

[1] **BLANC, C.**, (1983), «Hydrodynamique et rhéologie des colloïdes », Aussois septembre 1983, pp 1-34.

[2] **BATISTONI, P.**, (1997), « Pre-treatment, measurement, execution procedure and waste characteristics in the rheology of sewage sludges and the digested organic fraction of municipal solid wastes », *Wat. Sci. Tech.* 36, 11, pp 33-41.

[3] **BENGHANEM A.**, (1999), « Etude expérimentale des matières en suspensions : vase du barrage de Foum El Gherza » , Projet de Fin d'Etudes à l'Ecole Nationale Polytechnique.

[4] **BIRD R.B., STEWART W. E. et LIGHTFOOT E.N.**, (1960) « Transport Phenomena », J. Wiley and sons N. York.

[5] **COUARRAZE, G. et GROSSIORD, J. L.**, (1991), « Initiation à la rhéologie », Lavoisier, Paris, 312 p.

[6] **COUSSOT, P. et ANCEY, C.**, (1999), « Rhéophysique des pâtes et des suspensions », EDP Sciences, Les Ulis, France, 265 p.

[7] **DICK, R. I. et BUCK, J. H.**, (1985), « Measurement of activated sludge rheology », *Proc. EED, Spec. Conf, ASCE, J. C. O'Shoughnessy Ed*, pp 539–545.

[8] **FRANKEL, N. A. et ACRIVOS, A.**, (1967), « On the viscosity of concentrated suspension of solid spheres », *Chem. Eng. Sci.*, 22, pp 847- 853.

[9] **GOLDSMITH, H.L et MASSON S.G.**, (1967), « Rheology – Theory and applications », Vol 4, ed. Mir Moscou, 512p.

[10] **KETZ, R. J., PRUDHOMME, R. K. et GRAESSLEY, W. W.**, (1988), « Rheology of concentrated microgel solutions », *Rheol. Acta.*, 27, 5, pp 531–539.

- [11] LANDOUL. L et LIFCHITZ E. , (1971), « Mécanique des fluides », ed. Mir Moscou, 435p.
- [12] MAGNIN, A., PIAU, J. M., (1990), « Cone and Plate Rheometry of Yield Stress Fluids » , Annual review of Fluid Mechanics, 24, pp 47–88.
- [13] MIGNOT, C.,(1968), « Propriétés physiques des différents sédiments très fins et leur comportement sous les actions hydrodynamiques ». *La houille blanche* N° 07, pp591-620.
- [14] MIGNOT, C. , (1989), « Tassements et rhéologie des vases », *La houille blanche*, N° 01/1989, pp95-109.
- [15] PIAU, J. M., (1979), « Fluides non newtonien », Techniques de l'Ingénieur, A710, A711.
- [16] REMINI, B., (1997), «Envasement des retenues de barrages en Algérie : Importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique de soutirage », *Thèse doctorat d'état ENP*.
- [17] SHOWALTER, W. R., (1978), « Mechanics of non newtonien fluids », Pergamon press.

---

---

# ANNEXES

---

---

## ANNEXE 01 : Sédimentation

### Essais pour la détermination de la vitesse de chute et des tassements

La première expérience pour 3g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
37	488	488	1	0	487	1
255	488	484	2	4	486	2
280	488	481	2	7	486	2
307	488	476	2	12	486	2
336	488	475	2.5	13	485.5	2.5
372	488	473	3	15	485	3
453	488	471	3.5	17	484.5	3.5
1540	488	427	5	61	483	5

Deuxième expérience pour 3g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
94	488	488	1	0	487	1
252	488	485	2	3	486	2
289	488	482	2	6	486	2
312	488	478	2	10	486	2
345	488	474	2	14	486	2
376	488	471	2	17	486	2
405	488	462	3	26	485	3
1207	488	441	4	47	484	4

Troisième expérience pour 3g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
194	488	486	2	2	486	2
223	488	484	2.5	4	485.5	2.5
278	488	481	3	9	485	3
312	488	481	3	9	485	3
475	488	472	3.5	16	484.5	3.5
543	488	169	4	19	484	4

Première expérience pour 6g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
74	482	482	5	0	477	5
275	482	477	8	5	474	8
298	482	469	8	13	474	8
317	482	460	9	22	473	9
339	482	449	9	33	473	9
365	482	441	10	41	472	10
1254	482	374	11	108	471	11
1569	482	345	11	137	471	11

Deuxième expérience pour 6g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
131	482	482	7	0	485	7
265	482	475	8	7	474	8
296	482	470	8	12	474	8
318	482	465	9	17	473	9
352	482	458	9	24	473	9
426	482	439	10	46	472	10
1222	482	390	11	92	471	11

Troisième expérience pour 6g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
322	482	473	8	9	474	8
364	482	466	8	16	474	8
412	482	457	9	25	473	9
468	482	445	10	37	472	10
1254	482	493	11	89	471	11

Première expérience pour 10G

TC	ZC	ZCH	ZD	HD	HCH	HD
48	484	481	8	3	476	8
67	484	472	9	12	475	9
86	484	462	11	22	473	11
112	484	449	11	35	473	11
150	484	442	11	42	473	11
187	484	428	12	56	472	12
222	484	408	13	76	471	13
235	484	397	14	87	470	14
305	484	385	14	99	470	14
1254	484	222	15	192	469	15

Deuxième expérience pour 10G

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
125	484	447	10	37	474	10
168	484	438	11	46	473	11
194	484	433	12	51	472	12
218	484	427	13	57	471	13
364	484	398	14	86	470	14
1225	484	281	15	203	469	15

Troisième expérience pour 10G

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
65	484	467	8	17	476	8
112	484	451	10	33	474	10
183	484	440	11	44	473	11
243	484	430	12	54	472	12
342	484	423	13	61	471	13
367	484	418	14	66	770	14

Première expérience pour 20G

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
35	488	449	25	39	463	29
52	488	427	24	61	464	28
86	488	396	23	92	465	23
115	488	384	21	104	467	21
175	488	341	21	147	467	21
207	488	321	21	167	467	21
322	488	312	21	176	467	21



Deuxième expérience pour 20g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
5	488	3	27	3	461	27
28	488	464	25	24	463	25
92	488	415	24	73	464	24
162	488	369	22	119	466	23
245	488	345	21	143	467	21
312	488	335	21	153	467	21

Troisième expérience pour 20g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
30	488	461	26	27	462	26
52	488	443	24	45	464	24
74	488	424	23	64	465	23
105	488	407	22	81	466	22
132	488	379	22	109	466	22
156	488	364	21	124	467	21
289	488	335	21	153	467	21

Première expérience pour 50g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
24	497	488	317	05	180	317
39	497	481	223	16	214	223
66	497	469	82	28	415	82
92	497	458	64	39	433	64
115	497	454	57	43	440	57
178	497	430	54	67	443	54
205	497	414	53	83	444	53

Deuxième expérience pour 50g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
28	497	486	294	11	203	294
45	497	479	217	18	280	217
73	497	469	76	28	421	76
122	497	453	56	44	441	56
183	497	433	54	64	443	54
214	497	412	52	85	445	52

Troisième expérience pour 50g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
23	497	487	333	10	164	333
39	497	480	307	17	190	307
81	497	466	81	31	416	81
117	497	451	58	46	439	58
177	497	434	55	63	442	55
221	497	406	53	91	444	53

Première expérience pour 100g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
40	510	496	343	14	167	343
65	510	487	285	23	225	285
80	510	483	264	27	246	264
108	510	476	226	34	284	226
136	510	467	183	43	327	183
148	510	462	167	48	343	167
173	510	458	149	52	361	149

Deuxième expérience pour 100g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HC
23	510	503	396	7	114	396
56	510	591	304	19	206	304
74	510	483	277	27	233	277
13	510	474	198	36	312	198
152	510	465	164	45	346	164

Troisième expérience pour 100g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
36	510	497	351	13	159	351
67	510	488	294	22	216	294
88	510	483	279	27	231	279
116	510	470	248	40	262	248
149	510	463	173	47	337	173

Première expérience pour 150g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
20	514	509	484	5	30	484
52	514	503	438	11	76	438
67	514	499	415	15	99	415
86	514	493	406	21	108	406
109	514	487	350	27	164	350
136	514	482	331	32	183	331
148	514	476	270	36	244	270

Deuxième expérience pour 150g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
43	514	505	459	9	55	459
64	514	499	434	15	80	434
83	514	492	417	22	97	417
126	514	485	346	29	168	346
143	514	480	257	34	257	257

Troisième expérience pour 150g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
14	514	509	498	5	16	498
31	514	505	453	9	61	453
64	514	497	408	17	106	408
93	514	488	379	26	135	379
137	514	481	334	33	180	334

Première expérience pour 200g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
42	520	513	468	7	52	468
65	520	509	438	11	82	438
87	520	505	405	15	115	405
112	520	501	379	19	141	379
137	520	496	338	24	182	338
156	520	488	316	32	204	316

Deuxième expérience pour 200g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
27	520	515	497	5	23	467
52	520	510	459	10	61	459
76	520	504	427	16	93	427
109	520	500	388	20	132	388
137	520	493	346	27	174	346

Troisième expérience pour 200g

TC	ZC	ZCH	ZD	HC	HCH	HD
36	520	512	481	8	39	481
57	520	509	462	11	58	462
89	520	504	421	16	99	421
114	520	499	393	21	127	393
142	520	492	347	28	173	347
153	520	489	328	31	192	328

## ANNEXE 02 : Mesures rhéologiques

### Résultats

Essai N° : 1 , Echantillon : 10 g/l , Température : T = 22.4° C

Caractéristiques des cylindres : h = 24 mm, Ri = 4 mm , Rex = 6.5 mm ( 412 / 85 ).

N°	Taux de déformation $\dot{\gamma}$ ( s <sup>-1</sup> )	Viscosité apparente $\mu_a$ ( Pa . s )	Taux de cisaillement $\tau$ ( Pa )
1	5 E -5	1.69 E2	8.448 E -3
2	1 E -4	3.01 E 0	1.689 E -2
3	2 E -4	3 E 0	1.689 E -2
4	5 E -4	2.028 E 0	1.689 E -2
5	1 E -3	1.69 E 0	1.689 E -2
6	2 E -3	8.452 E -1	1.534 E -2
7	5 E -3	7.437 E -1	0.448 E -2
8	1 E -2	2.705 E -1	2.532 E -2
9	2 E -2	1.350 E -1	1.689 E -2
10	5 E -2	5.409 E -2	2.532 E -2
11	1 E -1	3.381 E -2	1.689 E -2
12	2 E -1	1.183 E -2	1.689 E -2
13	5 E -1	8. 114 E -3	1.689 E -2
14	1	4.057 E -3	1.689 E -2
15	2	3.300 E -3	1.689 E -2
16	5	2.190 E -3	2.532 E -2
17	10	1.759 E -3	2.534 E -2
18	20	1.335 E -3	3.379 E -2
19	50	1.081 E -3	5.913 E -2
20	100	1.014 E -3	6.75 E -2
21	120	1.056 E -3	1.014 E -1
22	150	2.91 E -3	1.267 E -1
23	200	3.88 E -3	5.49 E -1
24	250	5.91 E -3	9.800 E -1



## Résultats

**Essai N° : 2 , Echantillon : 3 g/l , Température : T = 23.9° C**

**Caractéristiques des cylindres : h = 24 mm, Ri = 4 mm , Rex = 6.5 mm ( 412 / 85 ).**

N°	Taux de déformation $\dot{\gamma}$ ( s <sup>-1</sup> )	Viscosité apparente $\mu_a$ ( Pa . s )	Taux de cisaillement $\tau$ ( Pa )
1	5 E -5	1.69 E 2	2.38 E -3
2	1 E -4	8.449 E 1	2.70 E -3
3	2 E -4	4.224 E 1	2.028 E -3
4	5 E -4	7.438 E 0	2.36 E -3
5	1 E -3	6.762 E 0	2.028 E -3
6	2 E -3	4.226 E 0	2.336 E -3
7	5 E -3	1.149 E 0	2.366 E -3
8	1 E -2	4.733 E -1	3.042 E -3
9	2 E -2	2.36 E -2	2.366 E -3
10	5 E -2	5.490 E -2	2.36 E -3
11	1 E -1	2.719 E -2	2.366 E -3
12	2 E -1	1.183 E -2	3.042 E -3
13	5 E -1	5.403 E -3	3.380 E -3
14	1	3.710 E -3	3.719 E -3
15	2	2.36 E -3	4.395 E -3
16	5	1.758 E -3	8.789 E -3
17	10	1.386 E	1.42 E -3
18	20	1.183 E -3	2.434 E -2
19	50	1.014 E -3	5.172 E -2
20	100	9.29 E -4	9.601 E -2
21	120	9.152 E -4	1.16 E -1
22	150	1.014 E -3	5.89 E -1
23	200	4.68 E -3	6.67 E -1
24	250	7.67 E -3	1.27 E 0

## Résultats

Essai N° : 2 , Echantillon : 20 g/l , Température : T = 22.9° C

Caractéristiques des cylindres : h = 24 mm, Ri = 4 mm , Rex = 6.5 mm ( 412 / 85 ).

N°	Taux de déformation $\dot{\gamma}$ ( s <sup>-1</sup> )	Viscosité apparente $\mu_a$ ( Pa . s )	Taux de cisaillement $\tau$ ( Pa )
1	5 E -5	4.056 E 0	9.005 E -5
2	1 E -4	2.028 E0	2.561 E -4
3	2 E -4	1.014 E 0	1.005 E -4
4	5 E -4	6.430 E -1	9.46 E -4
5	1 E -3	5.380 E -1	2.122 E -3
6	2 E -3	5.062 E -1	3.042 E -3
7	5 E -3	4.73 E -1	5.409 E -3
8	1 E -2	2.704 E -1	6.775 E -3
9	2 E -2	1.352 E -1	8.789 E -3
10	5 E -2	6.085 E -2	9.465 E -3
11	1 E -1	4.540 E -2	8.45 E -3
12	2 E -1	3.028 E -3	8.113 E -3
13	5 E -1	2.36 E -3	5.071 E -3
14	1	1.85 E -3	5.74 E -3
15	2	1.35 E -3	7.77 E -3
16	5	1.284 E -3	1.284 E -2
17	10	1.099 E -3	2.333 E -2
18	20	1.005 E -3	5.51 E -2
19	50	9.70 E -4	1.048 E -2
20	100	9.63 E -4	1.281 E -2
21	120	//	5.55 E -1
22	150	//	6.924 E -1
23	200	//	6.924 E -1
24	250	//	//

## Résultats

**Essai N° : 4 , Echantillon : 150 g/l , Température : T = 23.4° C**

**Caractéristiques des cylindres : h = 24 mm , Ri = 4 mm , Rex = 6.5 mm ( 412 / 85 ).**

N°	Taux de déformation $\dot{\gamma}$ ( s <sup>-1</sup> )	Viscosité apparente $\mu_a$ ( Pa . s )	Taux de cisaillement $\tau$ ( Pa )
1	5 E -5	(-) 3.379 E 1	2.70 E -2
2	1 E -4	2.19 E 2	3.21 E -2
3	2 E -4	1.858 E2	4.39 E -2
4	5 E -4	1.757 E 2	5.406 E -2
5	1 E -3	1.335 E 2	6.913 E -2
6	2 E -3	1.047 E 2	1.267 E -1
7	5 E -3	4.900 E 1	2.112 E -1
8	1 E -2	2.703 E 1	2.619 E -1
9	2 E -2	1.267 E 1	2.365 E -1
10	5 E -2	5.57 6 E 0	2.281 E -1
11	1 E -1	2.700 E 0	2.365 E -1
12	2 E -1	1.436 E 0	2.112 E -1
13	5 E -1	5.745 E -1	2.112 E -1
14	1	2.703 E -1	3.041 E -1
15	2	1.309 E -1	3.802 E -1
16	5	6.758 E -2	4.242 E -1
17	10	3.210 E -2	4.393 E-1
18	20	2.112 E -2	5.407 E -1
19	50	1.132 E -2	7.181 E-1
20	100	7.688 E -3	9.715 E-1
21	120	6.969 E -3	1.073 E 0
22	150	6.251 E -3	1.199 E 0
23	200	//	1.994 E 0
24	250	//	2.746 E 0

## Résultats

**Essai N° : 5 , Echantillon : 50 g/l , Température : T = 22.1° C**

**Caractéristiques des cylindres : h = 24 mm, Ri = 4 mm , Rex = 6.5 mm ( 412 / 85 ).**

N°	Taux de déformation $\dot{\gamma}$ ( s <sup>-1</sup> )	Viscosité apparente $\mu_a$ ( Pa . s )	Taux de cisaillement $\tau$ ( Pa )
1	5 E -5	3.397 E 2	(-) 2.53 E -2
2	1 E -4	6.76 E 0	(-) 3.37 E -3
3	2 E -4	1.69 E 0	6.75 E -3
4	5 E -4	8.38 E 0	3.04 E -2
5	1 E -3	7.23 E 0	6.42 E -2
6	2 E -3	7.13 E 0	7.60 E -2
7	5 E -3	3.43 E 0	8.014 E -2
8	1 E -2	9.87 E -1	9.098 E -2
9	2 E -2	6.75 E -1	1.014 E -1
10	5 E -2	3.043 E -1	1.014 E -1
11	1 E -1	1.52 E -1	1.098 E -1
12	2 E -1	9.98 E -2	1.098 E -1
13	5 E -1	4.39 E -2	1.183 E -1
14	1	2.36 E -2	1.352 E -1
15	2	6.75 E -3	1.431 E -1
16	5	2.70 E -3	1.774 E -1
17	10	1.68 E -3	1.858 E -1
18	20	1.18 E -3	2.281 E -1
19	50	1.31 E -3	3.29 E -1
20	100	1.19 E -3	4.47 E -1
21	120	//	4.98 E -1
22	150	//	5.66 E -1
23	200	//	1.21 E 0
24	250	//	1.85 E 0

## Résultats

**Essai N° : 6 , Echantillon : 100 g/l , Température : T = 22.7° C**

**Caractéristiques des cylindres : h = 24 mm , Ri = 4 mm , Rex = 6.5 mm ( 412 / 85 ).**

N°	Taux de déformation $\dot{\gamma}$ ( s <sup>-1</sup> )	Viscosité apparente $\mu_a$ ( Pa . s )	Taux de cisaillement $\tau$ ( Pa )
1	5 E -5	7.301 E1	3.38 E -4
2	1 E -4	2.352 E1	5.543 E -3
3	2 E -4	1.521 E 1	8.113 E -3
4	5 E -4	8.79 E0	2.70 E -2
5	1 E -3	6.42 E 0	4.562 E -2
6	2 E -3	5.07 E0	7.772 E -2
7	5 E -3	3.37 E0	9.96 E -2
8	1 E -2	3.041 E0	1.014 E -1
9	2 E -2	2.028 E 0	1.098 E -1
10	5 E -2	9.80 E -1	1.183 E -1
11	1 E -1	5.238 E -1	1.267 E -1
12	2 E -1	2.702 E -1	1.352 E -1
13	5 E -1	9.405 E -2	1.521 E -1
14	1	5.91 E -2	1.774 E -1
15	2	2.11 E -2	1.805 E -1
16	5	8.44 E -3	2.027 E -1
17	10	5.069 E -3	2.112 E -1
18	20	3.379 E -3	2.619 E -1
19	50	2.197 E -3	3.98 E -1
20	100	1.698 E -3	5.407 E -1
21	120	1.549 E -3	5.744 E -1
22	150	3.15 E -3	6.336 E -1
23	200	3.50 E -3	1.25 E 0
24	250	6.79 E -3	1.90 E 0

## Résultats

Essai N° : 7, Echantillon : 200 g/l, Température : T = 23.9° C

Caractéristiques des cylindres : h = 24 mm, Ri = 4 mm, Rex = 6.5 mm ( 412 / 85 ).

N°	Taux de déformation $\dot{\gamma}$ ( s <sup>-1</sup> )	Viscosité apparente $\mu_a$ ( Pa . s )	Taux de cisaillement $\tau$ ( Pa )
1	5 E -5	7.84 E 1	2.299 E -2
2	1 E -4	5.88 E 1	4.224 E -2
3	2 E -4	( - ) 6.47 E 0	5.744 E -2
4	5 E -4	2.42 E 1	7.772 E -2
5	1 E -3	3.82 E 1	2.281 E -1
6	2 E -3	3.53 E 1	2.872 E -1
7	5 E -3	5.55 E 1	3.717 E -1
8	1 E -2	4.05 E 1	4.139 E -1
9	2 E -2	2.281 E 1	4.475 E -1
10	5 E -2	9.46 E 0	4.738 E -1
11	1 E -1	4.90 E 0	4.308 E -1
12	2 E -1	2.61 E 0	4.308 E -1
13	5 E -1	8.448 E -1	4.84 E -1
14	1	4.055 E -1	5.069 E -1
15	2	2.027 E -1	5.66 E -1
16	5	9.293 E -2	6.589 E -1
17	10	4.731 E -2	6.251 E -1
18	20	2.745 E -2	7.181 E -1
19	50	1.453 E -2	9.208 -1
20	100	9.377 E -3	1.233 E 0
21	120	8.80 E -3	1.360 E 0
22	150	8.11 E -3	1.521 E 0
23	200	9.85 E -3	2.323 E 0
24	250	9.29 E -3	3.066 E 0

## Résultats

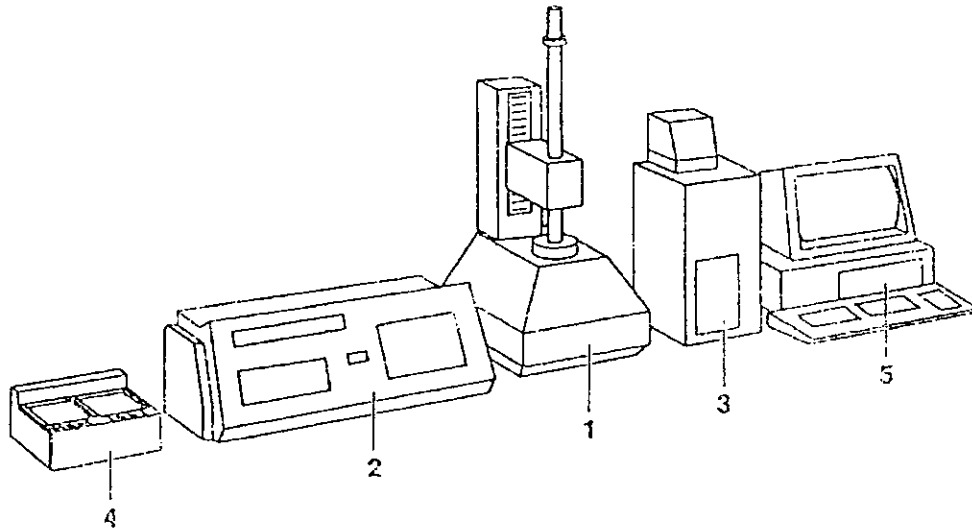
Essai N° : 7, Echantillon : 300 g/l, Température : T = 26.4° C

Caractéristiques des cylindres : h = 24 mm, Ri = 4 mm, Rex = 6.5 mm ( 412 / 85 ).

N°	Taux de déformation $\dot{\gamma}$ ( s <sup>-1</sup> )	Viscosité apparente $\mu_a$ ( Pa . s )	Taux de cisaillement $\tau$ ( Pa )
1	5 E -5	1.54 E 1	1.961 E -2
2	1 E -4	7.77 E 1	2.365 E -2
3	2 E -4	5.40 E 1	2.310 E -2
4	5 E -4	3.34 E 1	4.9 E -2
5	1 E -3	3.04 E 1	8.786 E -2
6	2 E -3	2.87 E 1	1.098 E -1
7	5 E -3	2.028 E 1	2.027 E -1
8	1 E -2	1.77 E 1	2.281 E -1
9	2 E -2	7.18 E 0	2.45 E -1
10	5 E -2	3.041 E 0	2.112 E -1
11	1 E -1	1.436 E 0	2.027 E -1
12	2 E -1	8.448 E -1	2.196 E -1
13	5 E -1	4.055 E -1	2.281 E -1
14	1	2.36 E -1	2.717 E -1
15	2	1.014 E -1	3.81 E -1
16	5	6.58 E -2	4.90 E -1
17	10	3.29 E -2	4.90 E -1
18	20	2.19 E -2	5.66 E -1
19	50	1.25 E -2	7.68 E -1
20	100	8.532 E -3	1.014 E 0
21	120	7.814 E -3	1.149 E 0
22	150	7.65 E -3	1.267 E 0
23	200	8.025 E -3	1.901 E 0
24	250	8.58 E -3	2.762 E 0

## ANNEXE 03 : Description du rhéomètre

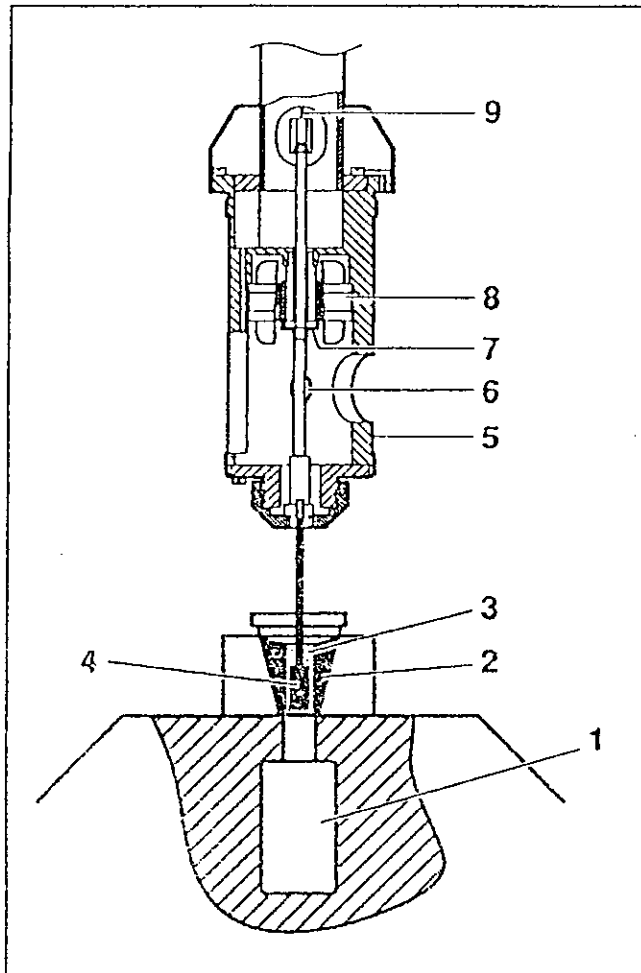
### Composante du rhéomètre :



- 1 - Instrument de mesure
2. Unité de contrôle
3. Thermostat
4. Contrôle de x, y et t
5. Ordinateur avec imprimante

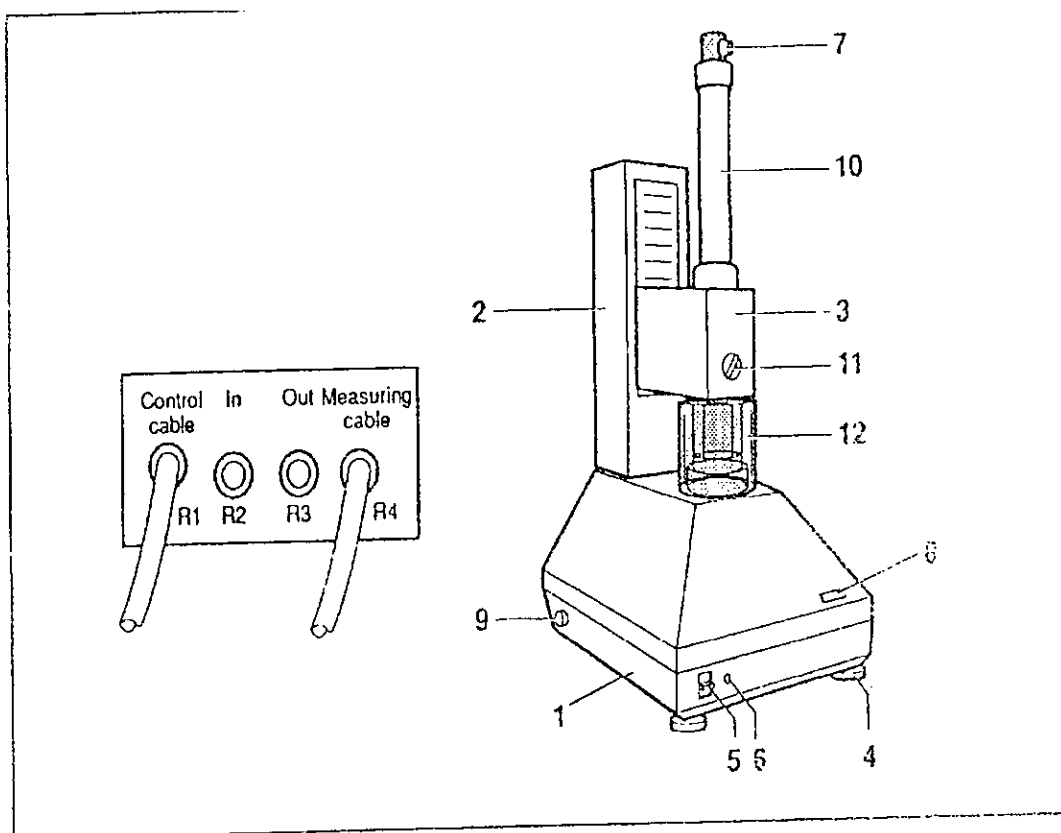


## Description de l'unité de mesure



- (1) Motor
- (2) Measuring cup
- (3) Test substance
- (4) Measuring bob
- (5) Measuring head
- (6) Mirror
- (7) Compensator
- (8) Stator
- (9) Load thread

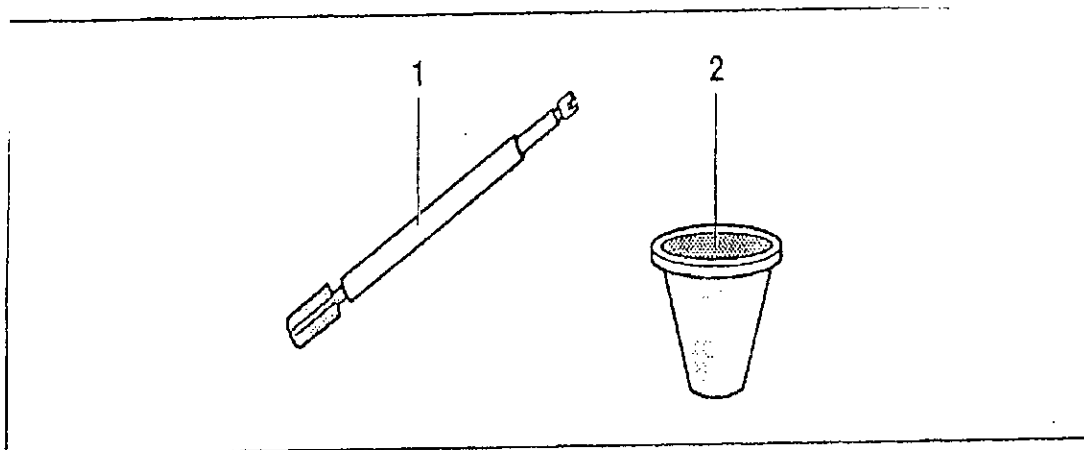
## Description de l'unité de mesure



- (1) Base
- (2) Height adjustment
- (3) Support
- (4) Leveling screws
- (5) Up/down switch
- (6) Indicator light
- (7) Zero point adjustment
- (8) Zero point indicator

- (9) Pt100 connection
- (10) Measuring head
- (11) Window
- (12) Draft shield
- (R1) Control cable
- (R2) Thermostating medium input
- (R3) Thermostating medium output
- (R4) Measuring cable

## Cylindres du rhéomètre



- 1 – Cylindre intérieur
- 2 – Cylindre extérieur

## Préparation de l'essai

