

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



Université Ibn Khaldoun de Tiaret  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie Mécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Énergétique

### Thème

Étude expérimentale du comportement  
rhéologique des liquides ioniques

Préparé par :

- MEKROUSSI Fatima Zohra
- SALEM Amina

Soutenu publiquement le : ... / 07 / 2021, devant le jury composé de :

Mr. ABED Belkacem	Maître de Conférences "A" (U I K-Tiaret)	Président
Mr. AKERMI Nasreddine	Maître de Conférences "B" (U I K-Tiaret)	Examineur
Mr. BENARIBA Aboubakeur	Maître de Conférences "B" (U I K-Tiaret)	Examineur
Mr. KARAS Abdelkader	Professeur (U I K-Tiaret)	Encadreur

Année universitaire : 2020 – 2021

## Remerciements

Tout d'abord, Nous tenons à remercier notre Dieu ALLAH tout puissant de nous avoir donné la patience et le courage pour réaliser ce modeste travail avec succès.

Ce travail a été réalisé au sein du département de Génie Mécanique de l'université Ibn Khaldoun de Tiaret en collaboration avec le laboratoire de recherches FIMA à l'université de Khemis Miliana.

Nous exprimons notre profonde gratitude envers notre encadreur, Monsieur KARAS Abdelkader, Professeur à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret qui a dirigé notre mémoire de fin d'étude avec compétence et sérieux.

Nous remercions les autres membres de jury, Monsieur ABED Belkacem Maître de conférences à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret qui a accepté de présider ce jury, Monsieur AKERMI Nasreddine Maître de conférences à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Monsieur BENARIBA Aboubakeur Maître de conférences à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, qui ont bien voulu rapporter sur mon travail et participer au jury.

A cette occasion je remercie moi Fatima Zohra, Monsieur HABRI Khaled, Monsieur CHAIB Khaled, Ben Ahmed Abdelillah et mon frère Said pour son soutien infailible durant mes années d'études. Je remercie tous les Enseignants de département de Génie Mécanique.

## Dédicace

*À ma très chère mère, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit, ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*À la mémoire de mon père Ali, que Dieu le garde dans son vaste paradis.*

*À mes très chères sœurs : Mordjana, sa petite famille, Naziha et surtout à Myada et sa petite famille, Fatima LABADI et Samiha, je souhaite tout le bonheur du monde.*

*À mes frères Belkacem, Houari, Said et leurs petites familles.*

*À mes chers petits frères Amine et Redha pour l'amour qu'ils me réservent je leurs souhaite une vie pleine du bonheur et de succès.*

*À mes collègues du travail surtout Amar DEBDAB*

*À mes chères, Sarra, Chaima, Wahiba, Fatima et Amina*

*À mes amies, au nom de l'amitié qui nous réunit et au nom de nos souvenirs inoubliables.*

*À tous ceux qui me sont chers.*

*Fatima Zohra*

*Je dédie ce travail à :*

*À mes chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences*

*À mes frères*

*À mes meilleures amies*

*À ma famille*

*À tous ceux que j'ai connus dans ma carrière universitaire*

*SALEM Amina*

# Sommaire

---

# Sommaire

---

Remerciement .....	i
Dédicace .....	ii
Sommaire .....	iii
Liste des figures .....	vi
Nomenclature .....	viii
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Introduction à la rhéologie

I.1. Introduction à la Rhéologie.....	3
I.1.1 Définitions .....	3
I.1.2 Différentes propriétés étudiées par la rhéologie .....	3
I.1.3 Notion de viscosité .....	4
I.1.3.1 Définition de la viscosité .....	4
I.1.3.1.1 Viscosité dynamique Loi de Newton .....	5
I.1.3.1.2 Viscosité cinématique.....	5
I.1.3.1.3 Viscosité utilisée dans l'étude des solutions .....	6
I.1.3.1.4 Equation d'état de la rhéologie .....	6
I.2. Notions élémentaires .....	6
I.2.1 Contrainte de cisaillement .....	7
I.2.2 La déformation et la vitesse de cisaillement .....	7
I.3. Comportements rhéologiques des fluides .....	8
I.3.1 Fluides Newtoniens .....	8
I.3.2 Fluides non Newtoniens .....	9
I.3.2.1 Fluides non newtoniens indépendants du temps (sans hystérésis).....	9

---

I.3.2.1.1 Fluides rhé fluidifiants ou pseudo plastiques .....	9
I.3.2.1.2 Fluides rhé épaississants .....	10
I.3.2.1.3 Fluides plastiques .....	11
I.3.2.2 Fluides non newtoniens dépendants du temps (avec hystérésis) .....	13
I.3.2.2.1 Fluides thixotropique .....	13
I.3.2.2.2 Fluides anti- thixotropiques .....	14
I.3.3 les fluides viscoélastiques .....	14
I.4 Principe et description des principaux rhéomètres .....	15
I.4.1 Rhéomètres à régime permanent .....	15
I.4.1.1 Rhéomètre de type couette .....	16
I.4.1.2 Rhéomètre de type poiseuille .....	18
I.4.1.3 Viscosimètres à chute de bille.....	19
I.4.2 Rhéomètres à régime transitoire .....	20
I.4.2.1 Rhéomètres à fluage.....	20
I.4.2.2 Rhéomètres à relaxation .....	21
I.4.3 Rhéomètres dynamiques (ou oscillants) .....	21
I.5 Conclusion .....	22

## Chapitre II : Les liquides ioniques

II.1 Généralités sur les liquides ioniques .....	23
II.1.1 Définitions .....	23
II.1.2 Historique .....	25
II.2 Propriétés physicochimiques .....	26
II.2.1 Densité .....	27
II.2.2 Point de fusion .....	27
II.2.3 Viscosité.....	28
II.2.4 Solubilité et solvataion .....	28
II.2.5 Stabilité chimique .....	29
II.3 Caractérisation des liquides ioniques présélectionnés .....	29
II.3.1 Solvants pour la catalyse et la synthèse organique.....	30
II.4 Applications des liquides ioniques .....	30
II.4.1 Synthèse organique.....	31
II.4.1.1 Solvants de synthèses .....	31

II.4.1.2 Catalyseurs homogènes supportés .....	32
II.4.1.3 Catalyseurs hétérogènes supportés .....	32
II.4.2 Électrochimie .....	32
II.5 Conclusion .....	33

### **Chapitre III : Partie expérimentale**

III.1 Fluides étudiés .....	34
III.2 Travail Expérimental .....	34
III.3 Présentation du dispositif expérimentale et mode opératoire .....	35
III.3.1 Description du MCR 302 .....	35
III.3.2 Mode de fonctionnement .....	36
III.3.3 Raccordement d'un bain à circulation .....	36
III.3.4 Montage de système de mesure.....	37
III.3.5 Raccordement au PC.....	38
III.3.5.1 Sélection du paramètre de communication .....	38
III.3.6 Utilisation du rhéomètre MCR .....	39
III.3.6.1 Mise sous tension de l'instrument.....	39
III.3.6.2 Panneau de commande MCR .....	39
III.3.6.3 Exécution d'une mesure .....	41
III.3.7 Démarrage et initialisation du MCR 302 .....	41
III.3.8 Chargement de l'échantillon .....	44

### **Chapitre IV : Analyse et interprétations des résultats**

IV.1 Introduction .....	46
IV.2 Résultats obtenus à l'aide du rhéomètre MCR 302 .....	46
IV.2.1 La courbe d'écoulement .....	46
IV.2.2 Effet de la température.....	48
Conclusion générale .....	51
Bibliographie .....	52
Résumé	

# Liste des figures

---

## Liste des figures

---

Figure I.1	Expérience de la plaque mobile.....	5
Figure I.2	Force s'exerçant sur une lame liquide.....	7
Figure I.3	Diagrammes caractéristiques des fluides newtoniens.....	8
Figure I.4	Rhéogramme d'un fluide rhéofluidifiant en loi de puissance.....	10
Figure I.5	Comportement d'un fluide épaississant.....	11
Figure I.6	Comportement d'un fluide Bingham.....	11
Figure I.7	Comportement d'un fluide de casson.....	12
Figure I.8	Rhéogramme d'un fluide de Herchel-Bukley .....	12
Figure I.9	Rhéogramme d'un fluide non newtonien dépendant du temps.....	13
Figure I.10	Fluide anti-thixotrope : (a) Au repos ; (b) Après une forte agitation.....	14
Figure I.11	Relaxation d'un corps viscoélastique.....	14
Figure I.12	Rhéomètres rotatifs cylindriques.....	17
Figure I.13	Rhéomètres rotatifs à cône/plateau.....	18
Figure II.1	Composition des fluides ioniques.....	23
Figure II.2	Cation et anion.....	24
Figure II.3	Autoassemblage en couches de liquides ioniques.....	24
Figure II.4	Structure chimique de Trichlorure d'aluminium.....	25
Figure II.5	Structure des principaux cations et anions rencontrés dans les liquides ioniques.	26
Figure II.6	Schéma de la réaction de synthèse du liquide ionique.....	30
Figure II.7	Application des liquides ioniques.....	31
Figure II.8	Principales caractéristiques des liquides ioniques.....	33
Figure III.1	Rhéomètre Modulaire Compact 302.....	35
Figure III.2	MCR en vue d'ensemble.....	35
Figure III.3	Système de mesure côté.....	36
Figure III.4	Bain à circulation du MCR.....	37

Figure III.5	Système de mesure monté.....	37
Figure III.6	MCR 302 raccordé à un PC.....	38
Figure III.7	Ecran du MCR.....	39
Figure III.8	Ecran du MCR.....	40
Figure III.9	Panneau de commande du MCR 302.....	40
Figure III.10	Lancement du logiciel du MCR.....	41
Figure III.11	Compresseur lié à MCR 302.....	42
Figure III.12	Exploitation du logiciel dans le réglage du MCR.....	43
Figure III.13	Choix de type de test pour la mesure.....	43
Figure III.14	Echantillon mis en place du MCR.....	45
Figure III.15	Un rhéomètre MCR 302 mis en marche.....	45
Figure IV.1	La variation de la viscosité de 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate en fonction du taux de cisaillement, expérimentale et par modèle Herschel Bulkley.....	47
Figure IV.2	La courbe d'écoulement de 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate, expérimentale et par modèle Herschel Bulkley.....	48
Figure IV.3	L'influence de la température sur la viscosité de 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate.....	49
Figure IV.4	Graphique de $\ln(\eta)$ en fonction de $T^{-1}$ pour 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate à différentes températures.....	49

# Nomenclature

---

# Nomenclature

---

$S$	Surface	$[m^2]$
$F$	Force	$[N]$
$T$	Température	$[K]$
$t$	Temps	$[s]$

## Symboles grecs

$\tau$	Contrainte de cisaillement	$[N/m^2]$
$\gamma$	Déformation de cisaillement	$[s^{-1}]$
$\rho$	Masse volumique	$[kg/m^3]$
$\mu$	Viscosité dynamique	$[Pa.s]$
$\nu$	Viscosité cinématique	$[m^2/s]$
$\eta_s$	Viscosité dynamique du solvant	
$\dot{\gamma}$	Vitesse de cisaillement	$[s^{-1}]$
$\mu_{sp}$	Viscosité spécifique $\mu_{sp} = \frac{\mu - \mu_s}{\mu_s} = \mu_{rel} - 1$	
$\eta_{re}$	Viscosité relative	
$n$	Indice de comportement ( $0 < n < 1$ )	
$\eta_e$	Viscosité plastique	$[pa.s]$
$K$	Indice de consistance	$[Pa.s^n]$
$\tau_c$	Contrainte critique	$[Pa]$
$E$	Module d'élasticité	
$\eta$	Coefficient de viscosités	
$\omega_0$	Vitesse angulaire de rotation constant	$[s^{-1}]$ ou rad/s

## Abréviations

LI(s)	Liquide(s) ionique(s)
PLI(s)	Polybliquide (s) ionique(s)
SILP	Supported ionic liquids phase
AlCl <sub>3</sub>	Trichlorure d'aluminium
DEA	Domaine d'électroactivité
BMIM BF <sub>4</sub>	Butyl-1-méthyl -3-imidazolium tétrafluoroborat

# Introduction générale

---

# **Introduction générale**

---

Les liquides ioniques (LIs) sont des sels comprenant des ions, qui existent à l'état liquide à température ambiante. Ils ont de nombreuses propriétés physiques et chimiques uniques telles qu'une pression de vapeur négligeable, une stabilité thermique et chimique, une conductivité ionique élevée et une excellente solubilité de nombreuses substances [1]. Plusieurs études ont été rapportées sur l'utilisation de LI sans solvants de réaction [2], les solvants d'extraction séparés [3] et les matériaux électrolytiques [4,5]. Ils peuvent également être utilisés comme éléments de nappage dans les polymères [6,7]. Du point de vue du traitement et de l'application, les propriétés mécaniques et rhéologiques de LI sont d'une importance vitale [8].

L'analyse rhéologique de ces liquides est d'une grande importance pour déterminer même les changements minimaux de morphologie. En raison des différences « notoires » liées à la mesure de la rhéologie de LI, des lacunes importantes dans les connaissances sur l'étude des propriétés d'écoulement sont restées encore larges.

Les propriétés rhéologiques de LI sont d'un intérêt majeur en raison du nombre croissant d'applications industrielles de ces nouveaux matériaux. Ces propriétés fournissent des informations clés sur la base moléculaire de ces fluides, ainsi que les valeurs nécessaires pour la conception technique.

La viscosité est l'une des propriétés rhéologiques les plus importantes des liquides, en tant que propriété de transport, a un grand effet sur le taux de masse transférée, et donc, la viscosité du solvant est un facteur important dans tous les processus chimiques et la conception[9].leur caractère biodégradable, leur faible coût de production et leur simple réaction chimique, ils ont une tendance très soluble dans l'eau et les composés polaires (alcools, acides, etc.), ce qui augmente considérablement leur importance potentielle en termes industriels [9].

Dans les études rhéologiques, des paramètres tels que la température et la composition doivent être pris en compte.

Les objectifs de cette étude de recherche sont: (i) d'étudier la variation du viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement, (ii) d'obtenir un modèle mathématique pour bien décrire les comportements rhéologiques de LI, finalement, d'étudier l'effet de la température sur les comportements rhéologiques de cet liquide.

La présente mémoire est organisée deux parties : un est bibliographique et l'autre est expérimentale.

**I** : la partie bibliographique comporte deux chapitres :

**Chapitre I**: est consacré aux notions de base de la rhéologie tels que : les grandeurs et les modèles rhéologiques des fluides

**Chapitre II**: on a présenté une généralité sur les liquides ioniques

**II** : la partie expérimentale, elle se divise en deux chapitres :

**Chapitre III**: on a fait une description détaillée sur le Rhéomètre utilisé et sur le déroulement d'essais et aussi.

**Chapitre IV**: dans le dernier chapitre nous exposons et évaluons les résultats obtenues par les essais expérimentaux.

Enfin nous terminons ce travail par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

# Chapitre I

## Introduction à la rhéologie

---

# Chapitre I

---

## Introduction à la rhéologie

---

### I.1 Introduction à la Rhéologie

#### I.1.1 Définitions

Le mot « rhéologie » a été proposé par Eugene Cook Bingham, en 1928, pour désigner « la science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière ». Plus exactement, l'objet de la rhéologie est l'étude du comportement mécanique, c'est-à-dire des relations entre les déformations et les contraintes de la matière. Ensuite, s'appuyant sur la connaissance de ce comportement, on calculera, grâce à la mécanique des milieux continus, la répartition non uniforme des contraintes et des déformations dans un corps sous l'effet des forces extérieures. Dans ses calculs pratiques, l'ingénieur fait appel aux disciplines appliquées, telle la résistance des matériaux et l'hydraulique.

En réalité, la rhéologie a été créée pour répondre aux besoins de la technologie moderne ; les différentes branches de la mécanique développées au XIX<sup>e</sup> siècle (l'élasticité, la plasticité, la mécanique des fluides)[12]. Ainsi que l'impuissance de la mécanique des fluides et des solides à décrire et expliquer les propriétés des matériaux ou comportement intermédiaire entre celui du fluide Newtonien et celui de solide plastique [10].

#### I.1.2 Différentes propriétés étudiées par la rhéologie

La rhéologie est l'étude du changement de la forme et de l'écoulement sous l'effet des contraintes, Cette étude comprend : l'élasticité, la plasticité et la viscosité

- a- **Elasticité** : Quand on applique une force à une matière, cette dernière subira une déformation. Quand on supprime la force, si la matière retourne à son état initial, nous sommes en présence d'une matière élastique. Si cette matière est un fluide, n'importe quel système de forces va engendrer un écoulement. Quand on supprime cette force, le fluide ne revient pas à son état

initial le fluide n'est donc pas élastique.

- b- **Plasticité** : Un fluide auquel on doit appliquer une force supérieure au seuil de cisaillement pour qu'il puisse s'écouler, est un fluide plastique. Si la contrainte appliquée est inférieure au seuil de cisaillement, ce fluide a un comportement élastique.

Le seuil de cisaillement est donc la contrainte au-dessous de laquelle le fluide a un comportement élastique.

- c- **Viscosité** : La viscosité peut être définie comme étant la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. La viscosité dynamique représente la contrainte de cisaillement nécessaire pour produire un gradient de vitesse d'écoulement d'une unité dans la matière. Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue.

### I.1.3 Notion de viscosité

L'étude viscosimétrique est une étude très importante pour un fluide, elle permet de définir les paramètres essentiels qui caractérisent le fluide et son comportement rhéologique.

Les coefficients de viscosité sont des grandeurs physiques qui jouent un rôle essentiel en rhéologie leur connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau.

#### I.1.3.1 Définition de la viscosité

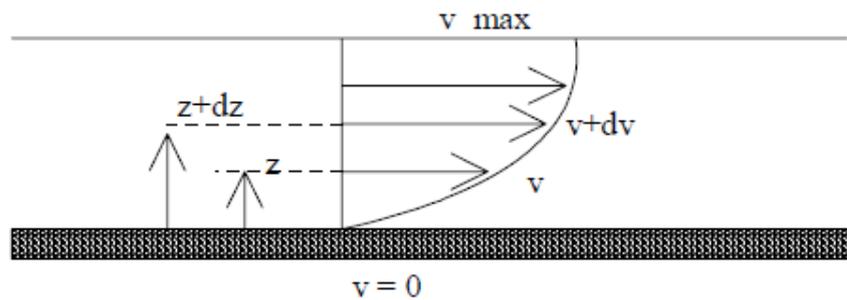
La viscosité est le critère qui différencie un fluide réel d'un fluide parfait. Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et des forces d'interaction entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. On dit qu'il existe un profil de vitesse [11].

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

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

### I.1.3.1.1 Viscosité dynamique Loi de Newton

Considérons deux couches contiguës distantes de  $dz$ .



**Figure I.1.** Expérience de la plaque mobile

La force de frottement  $F$  qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit  $dv$ , à leur surface  $S$  et inversement proportionnelle à  $dz$  :

$$F = -\eta S \frac{dv}{dz} \quad (\text{I.1})$$

Le facteur de proportionnalité  $\eta$  est le coefficient de viscosité dynamique du fluide [9].

Le tableau I.1 représente des valeurs de viscosité de quelques substances [4].

Matériaux	Viscosité (Pa.S)
Air	$10^{-5}$
Eau	$10^{-3}$
Huile d'olive	$10^{-1}$
Glycérine	1
Polymères fondus	$10^3$
Bitume	$10^8$

**Tableau I.1.** Quelques valeurs de la viscosité de substances usuelles à température ambiante.

### I.1.3.1.2 Viscosité cinématique

Le coefficient de viscosité cinématique est défini à partir du coefficient de viscosité dynamique  $\eta$  par la relation [12].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{I.2})$$

Où  $\rho$  est la masse volumique du fluide.

### I.1.3.1.3 Viscosité utilisée dans l'étude des solutions [13]

a) *Viscosité relative* :

La viscosité relative est le quotient de la viscosité de la solution par la viscosité du solvant :

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_s} \quad (\text{I.3})$$

avec :  $\eta_r$  la viscosité relative,  
 $\eta_s$  la viscosité dynamique du solvant,  
 $\eta$  la viscosité dynamique de la solution.

b) *Viscosité spécifique* :

La viscosité spécifique est exprimée par la formule suivante :

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_s}{\eta_s} \quad (\text{I.4})$$

### I.1.3.1.4 Equation d'état de la rhéologie

La détermination de ces deux grandeurs (contrainte de cisaillement et déformation ou vitesse de cisaillement) permet de définir l'équation rhéologique d'état du matériau, c'est-à-dire la relation les unissant ( $\gamma = f(\tau)$  ou bien  $\dot{\gamma} = f(\tau)$ ). Les rhéogrammes sont les courbes traduisant graphiquement l'équation rhéologique d'état du matériau. La représentation la plus courante consiste à exprimer la variation de la contrainte de cisaillement avec celle de la vitesse de cisaillement.

## I.2 Notions élémentaires

Un matériau soumis à un ensemble de forces est susceptible de se déformer, les mouvements des différents points du matériau dépendant bien entendu de la répartition et de l'intensité des forces appliquées. Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré pour certaines distributions de ces forces. Au cours d'un tel mouvement, on considère que le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes. La déformation du matériau s'effectue par glissement relatif des différentes couches, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre.

### I.2.1 Contrainte de cisaillement

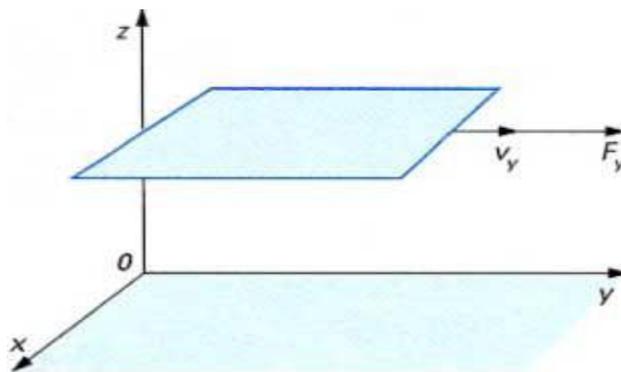
La contrainte de cisaillement  $\tau$  est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, elles sont appelées force de cisaillement.

En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface, on définit la contrainte de cisaillement  $\tau$  par l'équation :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (I.5)$$

$\tau$ : représente une force par unité de surface, elle s'exprime en ( $N/m^2$ ) ou bien plus commodément en Pascal (Pa) et  $dS$  est la surface élémentaire de l'entité considérée.

La contrainte de cisaillement est une grandeur définie en tout point du matériau. Elle varie en général d'une couche à l'autre mais est constante en tout point de la même couche [14].



*Figure I.2. Force s'exerçant sur une lame liquide*

### I.2.2 La déformation et la vitesse de cisaillement

La déformation est présentée dans le cas particulier le plus simple d'un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane. Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile.

La vitesse de cisaillement caractérise la variation de la vitesse entre les couches limites et est égale au quotient de la vitesse  $v$  et de l'épaisseur  $z$  de l'échantillon. La vitesse étant une longueur divisée par un temps, ce quotient s'exprime donc en inverse de seconde ( $S^{-1}$ ). La valeur de la vitesse de cisaillement dépend par conséquent, non seulement de la vitesse de déplacement de la couche mobile mais aussi, et de façon critique, de l'épaisseur  $z$  cisailée. Si cette dernière est faible, on peut

atteindre des vitesses de cisaillement très élevées, même avec des vitesses de déplacement relativement faibles, et inversement [4].

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dz} \quad (\text{I.6})$$

Soit :

$$\tau = \eta \cdot (\dot{\gamma}) \quad (\text{I.7})$$

L'expression ainsi obtenue relie la contrainte de cisaillement  $\tau$  au gradient de vitesse  $\dot{\gamma}$ , appelé aussi vitesse de cisaillement, et à la viscosité de cisaillement  $\eta$ , ou viscosité dynamique. Cette relation n'est valable que si l'écoulement est laminaire, c'est-à-dire si les couches fluides glissent effectivement les unes sur les autres, sans mouvement désordonné [5].

### I.3 Comportements rhéologiques des fluides

On distingue les fluides newtoniens, les fluides non newtoniens indépendants ou dépendants du temps et les fluides viscoélastiques.

#### I.3.1 Fluides Newtoniens

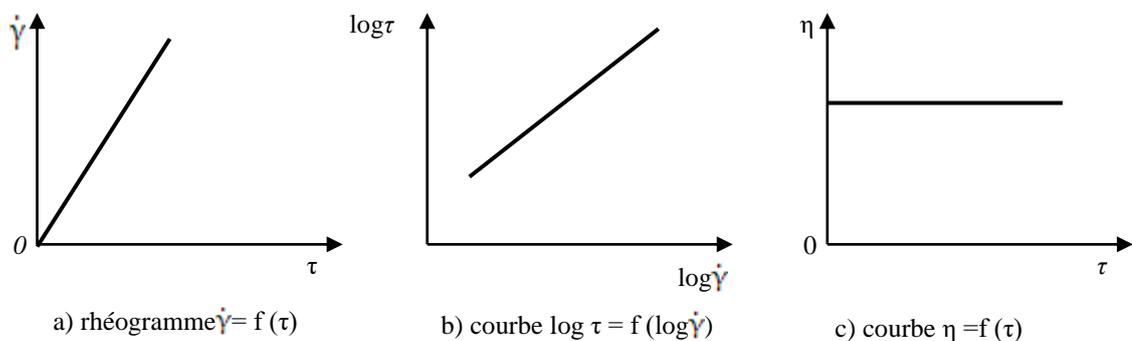
Les fluides newtoniens montrent un comportement proportionnel.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{I.8})$$

Ils sont caractérisés par des droites de pente  $1/\eta$  dans les diagrammes  $\dot{\gamma} = f(\tau)$  (appelés rhéogrammes) ou de pente unité en  $\lg \tau = f(\lg \dot{\gamma})$  et par une horizontale dans les diagrammes  $\eta = f(\tau)$  ou  $\lg \eta = f(\lg \tau)$ .

Parmi les fluides newtoniens on peut citer (eau, Benzine, ....etc.).

Les Rhéogrammes des fluides newtonien ont l'aspect suivant :



**Figure I.3.** Diagrammes caractéristiques des fluides newtoniens [5].

### I.3.2 Fluides non Newtoniens

La majorité des fluides présentent toutefois des comportements non-newtoniens qui font appel à l'utilisation de modèles rhéologiques plus complexes pour décrire leur comportement en écoulement.

Dans ce cas la viscosité  $\eta$  n'est pas constante. À chaque valeur du couple ; vitesse de cisaillement, contrainte de cisaillements  $(\dot{\gamma}, \tau)$  correspond une valeur de la viscosité  $\eta$ . Dès lors, on parle de la viscosité apparente. Les fluides non-Newtoniens, sont des fluides complexes, comme les fluides ; agro-alimentaires, les polymères, les boues de forage, les laitiers de ciment, etc...

Les fluides non-Newtoniens sont classés en deux grandes parties :

- Fluides non-Newtoniens aux comportements indépendants du temps.
- Fluides non-Newtoniens aux comportements dépendant du temps.

#### I.3.2.1 Fluides non newtoniens indépendants du temps (sans hystérésis)

Ce type de corps (fluide) est caractérisé par un comportement indépendant du temps, et pour n'importe quelle vitesse de déformation  $\dot{\gamma}$  il y a une fonction univoque de la contrainte de cisaillement  $\tau$ .

Du point de vue de la viscosité de cisaillement, ces fluides peuvent se classer assez grossièrement en trois catégories

##### I.3.2.1.1 Fluides rhé fluidifiants ou pseudo plastiques

La diminution de la viscosité avec l'augmentation du taux de cisaillement, (rhé fluidification), est observée pour la plupart des fluides non newtoniens, ils sont appelés fluides pseudo plastiques ou fluides rhé fluidifiants, ce comportement très répandu, s'observe sur les solutions polymères et les suspensions aqueuses, les pétroles, le latex de caoutchouc, la pâte à papier, les colles, certaines peintures, etc.

Le modèle de Waele et Ostwald a été largement utilisé de façon empirique dans l'industrie, il est donné par [14] :

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.9})$$

Avec :

K : indice de consistance ou consistance,

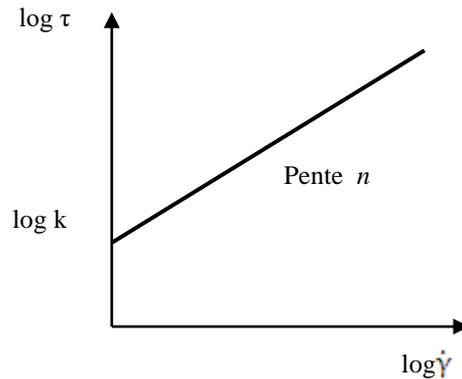
n : indice de comportement ( $0 < n < 1$ ).

Dans le modèle d'Ostwald, la viscosité s'exprime par :

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (\text{I.10})$$

Le cas où  $n=1$  correspond au comportement newtonien. Il est judicieux de tracer le rhéogramme en coordonnées log-log.

Où la pente de la droite donne l'exposant  $n$  et l'ordonnée à l'origine la constante  $K$ .



**Figure I.4.** Rhéogramme d'un fluide rhéofluidifiant en loi de puissance [6].

### I.3.2.1.2 Fluides rhé épaisissants

Au contraire des fluides rhés fluidifiants, leur viscosité apparente augmente avec la contrainte de cisaillement ; mais, comme eux, ils peuvent également présenter un domaine newtonien initial et final. Une équation du type équation d'Ostwald (loi de puissance) [14] :

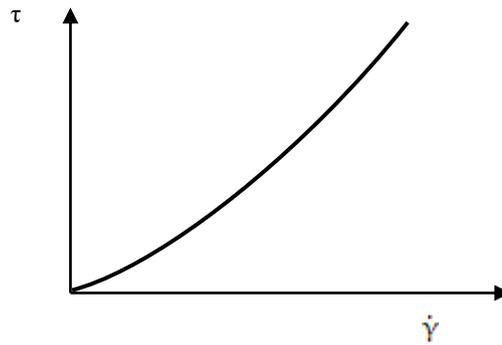
$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.11})$$

Avec :  $n > 1$

Ce type de comportement a été primitivement mis en évidence sur les suspensions de forte teneur en solide. Au repos, le volume libre entre les particules est minimal et ce volume libre est occupé par du liquide qui lubrifie le mouvement des particules au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement croît.

La structure solide devient de plus en plus lâche et le liquide est en défaut dans les lacunes (il y a gonflement du fluide). Aux frottements solide-liquide initiaux se substituent partiellement des frottements solides –solides qui accroissent rapidement la viscosité apparente.

Le comportement rhé épaisissant (encore appelé dilatant) est défini par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le haut [13].



**Figure I.5.** Comportement d'un fluide épaississant.

### I.3.2.1.3 Fluides plastiques

Ils sont caractérisés par une contrainte de cisaillement seuil  $\tau_c$  au-dessous de laquelle l'écoulement est impossible.

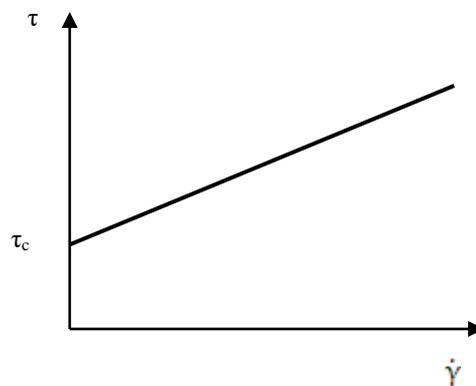
a) *Fluides plastiques idéal ou de Bingham :*

La courbe d'écoulement est caractérisée par un taux de déformation linéaire de la contrainte lorsque cette contrainte dépasse un seuil  $\tau_c$ , on peut alors obtenir l'équation rhéologique d'état qui est celle d'un liquide de Bingham[13] :

$$\tau - \tau_c = \eta_p \dot{\gamma} \quad (\text{I.12})$$

Avec :  $\eta_p$  est la viscosité plastique

Le liquide de Bingham a une propriété qui est celle d'un corps qui ne commence à s'écouler qu'au-delà du seuil d'écoulement : il ne présente pas de déformation permanente pour des contraintes plus faible. Lorsqu'on dépasse le seuil d'écoulement il ressemble à un liquide Newtonien, c'est-à-dire que l'augmentation de la vitesse de déformation  $\dot{\gamma}$  provoque l'augmentation proportionnelle de  $\tau$ .



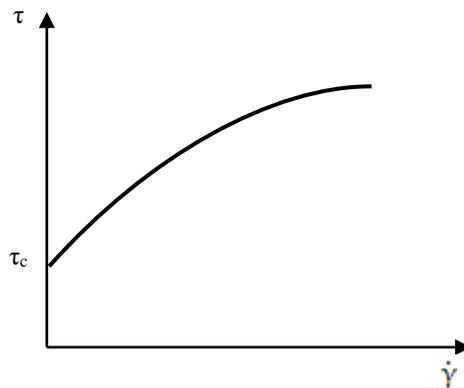
**Figure I.6.** Comportement d'un fluide Bingham.

b) *Fluides plastiques non idéals ou de Casson :*

Ces liquides possèdent également un seuil d'écoulement comme les fluides de Bingham, mais ne présentent pas au-delà de ce seuil un comportement Newtonien, leur fluage est décrit par l'équation rhéologique suivante :

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\eta_p \dot{\gamma}} \quad (\text{I.13})$$

La viscosité  $\eta_p$  et la contrainte critique de seuil  $\tau_c$  peuvent être déterminées directement d'après le pseudo-Rhéogramme en coordonnées bi-logarithmiques [1].



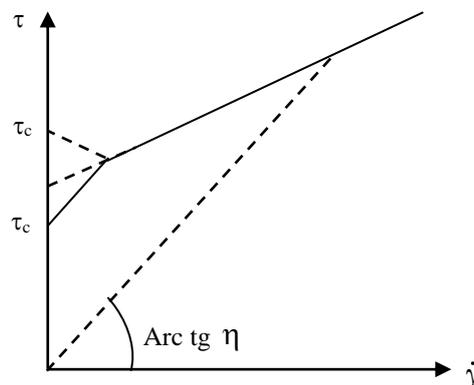
**Figure I.7.** Comportement d'un fluide de Casson.

c) *Fluides de Herschel-Bukley :*

Ces fluides sont plus compliqués et peuvent être décrits à l'aide de trois paramètres rhéologiques  $\tau_c$ ,  $K$  et  $n$ . Leur fluage est représenté par la formule suivante

$$\tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.14})$$

Ils sont caractérisés par la rhéogramme de la figure I.7.

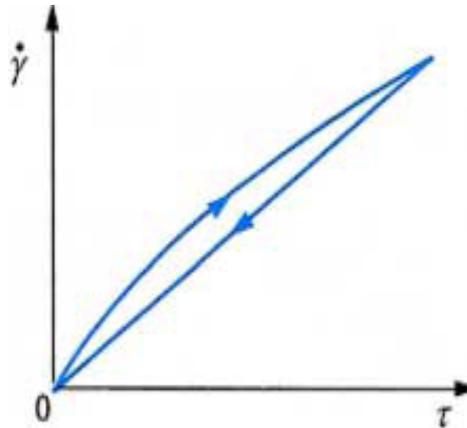


**Figure I.8.** Rhéogramme d'un fluide de Herschel-Bukley

### I.3.2.2 Fluides non newtoniens dépendants du temps (avec hystérésis)

Lorsque la variation de la viscosité par rapport à la vitesse de cisaillement est superposée par une variation dépendante du temps de cisaillement, on parle donc de fluide à comportement dépendant du temps [13].

Le mode expérimental adopté pour tracer des courbes d'écoulement revêt une grande importance. Lorsque la rhéogramme obtenue représente toujours la même courbe quel que soit le temps mis pour atteindre les différentes contraintes ou vitesse de cisaillement de la mesure. On dit que ce corps ne présente pas d'hystérésis (il n'a pas d'histoire), par contre si la courbe de retour ne coïncide pas avec la courbe d'aller, on dit que le corps présente d'hystérésis [10].



**Figure I.9.** Rhéogramme d'un fluide non newtonien dépendant du temps [14].

On distingue deux catégories dans ce type de fluide :

- Les fluides thixotropiques,
- Les fluides anti- thixotropiques.

#### I.3.2.2.1 Fluides thixotropique

Une substance est dite thixotropique, lorsque sa viscosité n'est plus fixée pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement mais dépend également d'un autre paramètre qui est le temps [10].

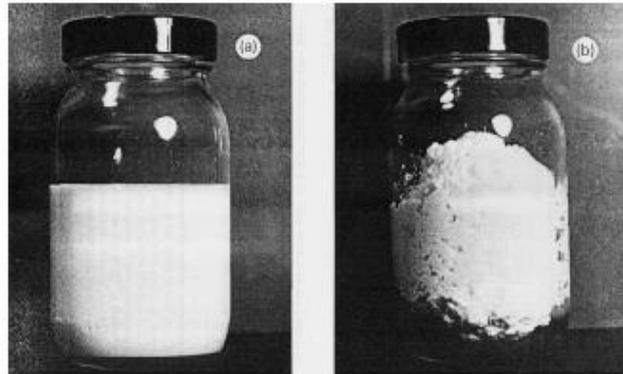
*Exemples:* Peintures, pâtes agro-alimentaires, fluides biologiques, etc...

Si l'on applique une déformation constante, les contraintes décroissent avec le temps. La consistance du matériau dépend du gradient et de la durée d'application de la contrainte, tout en supposant que la structure originale se réformé après un certain temps de repos. Ce comportement peut être expliqué par une destruction progressive de la structure. Si cette structure peut se reformer

et la viscosité retrouve sa valeur initiale après un temps de repos à contrainte nulle, le fluide est dit thixotropique. [10]

### I.3.2.2 Fluides anti- thixotropiques

C'est le cas inverse des fluides thixotropiques, les fluides anti- thixotropiques ont une viscosité qui croît avec le temps d'application à contrainte  $\tau$  ou à vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$  donnée. Ces substances sont assez rares [10].



**Figure I.10.** Fluide anti-thixotrope : (a) Au repos ; (b) Après une forte agitation [14].

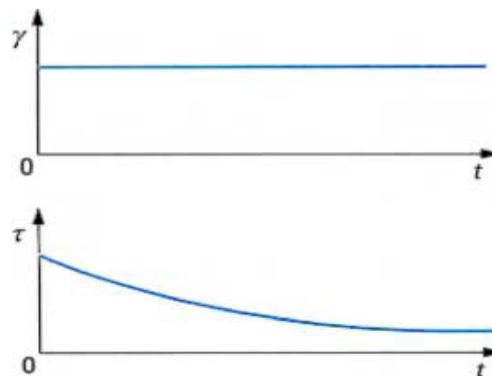
### I.3.3 les fluides viscoélastiques

Un fluide viscoélastique est un matériau qui possède à la fois des propriétés visqueuses et élastiques, les grandeurs caractérisant ces propriétés étant dépendantes de la durée d'application de la déformation ou de la contrainte.

Le modèle le plus simple de fluide viscoélastique consiste à additionner les contraintes d'origine élastique et les contraintes d'origine visqueuse :

$$\tau = \tau_{\text{élast}} + \tau_{\text{visco}} = E \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{I.15})$$

où  $E$  est un module d'élasticité et  $\gamma$  est la déformation.



**Figure I.11.** Relaxation d'un corps viscoélastique [14].

## I.4 Principe et description des principaux rhéomètres

Les rhéomètres peuvent être classés en trois catégories :

- 1) Les rhéomètres à régime permanent : utilisés comme viscosimètres, ils permettent néanmoins d'obtenir des rhéogrammes pour des liquides.
- 2) Les rhéomètres à régime transitoire permettent l'étude de la viscoélasticité des matériaux.
- 3) Les rhéomètres dynamiques qui fonctionnent en régime sinusoïdal forcé sont sûrement ceux qui fournissent le plus de renseignements des matériaux.

Il faut noter que certains rhéomètres, à condition de leur adjoindre des équipements accessoires, sont susceptibles de fonctionner aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire ou dynamique ; il en est ainsi de la plupart des rhéomètres de type couette nous avons cependant choisi d'introduire séparément les trois types possibles de fonctionnement, afin de présenter de façon claire et distincte les principes et équations d'utilisation. [14]

### I.4.1 Rhéomètres à régime permanent

Dans ces rhéomètres la substance étudiée à un mouvement laminaire de cisaillement indépendant du temps, les différentes couches s'écoulent sans que vitesse et contrainte de cisaillement ne subissent aucune modification au cours du temps.

L'utilisation de tels rhéomètres se réduit donc à l'étude des seules substances possédant le comportement liquide capables par conséquent de suivre un processus d'écoulement permanent, l'objectif expérimental recherché étant la détermination de leur rhéogramme.

Dans cette catégorie, nous distinguerons essentiellement deux types de rhéomètres :

- Les rhéomètres de type couette dans lesquels la substance étudiée est cisailée entre deux surfaces solides, l'une au repos l'autre mobile.
- Les rhéomètres de type poiseuille dans lesquels le mouvement de cisaillement est engendré par l'application aux extrémités d'un tube cylindrique contenant l'échantillon d'une différence de pression ou encore par l'action de la pesanteur.

Nous présenterons également le viscosimètre à chute de bille dont les possibilités sont limitées, mais qui est cependant très connu et relativement utilisé. [14]

### I.4.1.1 Rhéomètre de type couette : [16]

#### a) Rhéomètres plans à translation :

La substance à étudier est placée entre deux plans solides parallèles et de même surface  $S$ .  $P_1$  et  $P_2$  : Une force  $\vec{F}$  constante est appliquée tangentiellement au plan mobile  $P_2$  lui communiquant un mouvement de translation parallèle à lui-même de vitesse  $\vec{v}_0$  le plan  $P_1$  demeurant fixe.

Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré si l'on suppose que la distance « e » entre les plans est faible devant les dimensions linéaires de la surface  $S$  des plans, on pourra admettre, en négligeant les effets de bord, que l'écoulement possède la symétrie plane et matériau se décompose en plans parallèles aux surfaces  $P_1$  et  $P_2$  animés de vitesses distinctes qui se répartissent continûment de  $\vec{v}_0$  (vitesse de la couche au contact de  $P_2$ ) à 0 (vitesse de la couche au contact de  $P_1$ )

Les rhéomètres plans sont peu nombreux ; ils sont souvent peu précis et, de ce fait, utilisés surtout pour des contrôles grossiers. On peut les classer en deux catégories :

- appareils à lames, qui sont utilisés pour la mesure de viscosités de 1 à  $3 \cdot 10^3$  Pa.s ;
- appareils à plaques, pour la mesure de viscosités comprises entre 10 et  $10^{10}$  Pa.s ;

#### b) Rhéomètres rotatifs cylindriques :

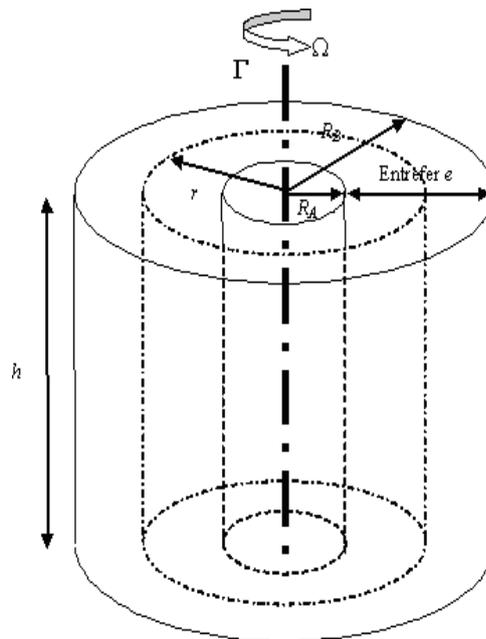
C'est la classe de rhéomètres la plus fréquemment utilisée. C'est pourquoi nous avons tenté d'en faire une présentation aussi complète que possible ; et cela d'autant plus que le fonctionnement de tels rhéomètres étant le plus souvent automatisé, la plupart des manipulateurs connaissent mal le principe, les équations, les limites de fonctionnement de ce type d'appareils : cette méconnaissance peut déboucher sur une utilisation erronée ou de graves erreurs d'interprétation.

La substance étudiée emprisonnée entre deux cylindres de révolution, coaxiaux de rayons  $R_1$  et  $R_2$  et de hauteur  $h$ . Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant à l'un des cylindres un mouvement de rotation uniforme de vitesses angulaires  $\omega_0$ , l'autre cylindre demeurant immobile, notons que l'on rencontre des rhéomètres cylindriques dans lesquels le cylindre mobile est intérieur ou au contraire extérieur. Pour fixer les idées. Nous avons choisi de

décrire ici un rhéomètre avec cylindre intérieur fixe, cylindre extérieur mobile.

La substance se décompose en couches cylindriques coaxiales, animées de vitesses angulaires différentes, variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le cylindre intérieur fixe) à  $\omega_0$  (pour la couche en contact avec le cylindre extérieur mobile).

Par suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement et une contrainte de cisaillement  $\tau$ .



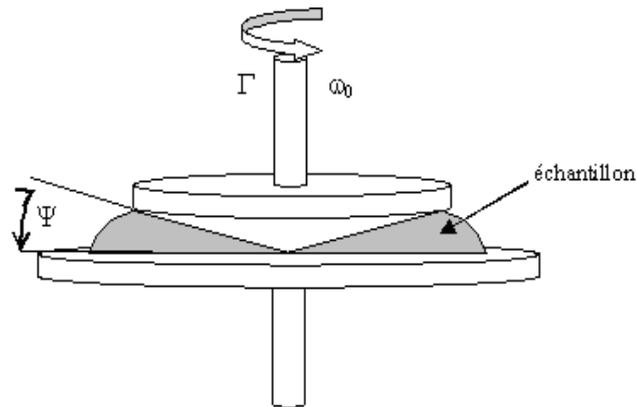
**Figure I.12.** Rhéomètres rotatifs cylindriques.

c) Rhéomètres rotatifs à cône/plateau :

Bien que moins répandu que le rhéomètre cylindrique ce type de rhéomètre possède de très grandes qualités qui font de lui un conçu et un complément indispensable au rhéomètre cylindrique.

La substance étudiée est emprisonnée entre un plateau et un cône de révolution de rayon  $R$ , dont l'axe est perpendiculaire au plan de plateau et dont le sommet est situé sur le plateau.

L'angle  $\Psi$  que fait la génératrice du cône et le plateau est petit il est toujours inférieur à  $5^\circ$  et peut descendre jusqu'à  $0,3^\circ$ .



**Figure I.13.** Rhéomètres rotatifs à cône/plateau.

Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant au cône une vitesse de rotation constante  $\omega_0$ , le plateau demeurant fixe la substance se décompose alors en couches, qui sont constituées par des cônes de révolution de même sommet et de même axe que le cône solide animées de vitesses angulaires de rotation différente, variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le cône solide).

Par suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement  $\varepsilon$  et une contrainte de cisaillement  $\tau$ .

On rencontre indifféremment les deux procédures expérimentales suivantes :

On peut imposer au cône :

-soit un couple de rotation connue  $M$  ; on mesure alors la vitesse angulaire  $\varepsilon$  correspondante.

-soit une vitesse angulaire de rotation  $\omega_0$  donnée on mesure alors le couple de rotation  $M$  correspondant.

Il est nécessaire de connaître les relations qui existent entre  $\varepsilon, \tau$  et les quantités accessibles expérimentalement à savoir  $\omega_0$  et  $M$ .

#### **I.4.1.2 Rhéomètre de type poiseuille**

Cette classe de rhéomètres, de mise en œuvre relativement simple, est utilisée surtout comme viscosimètres pour des mesures rapides de la viscosité absolue de liquides newtoniens.

Dans ce type de rhéomètre, le mouvement est engendré en imposant une différence de pression entre deux des extrémités d'un tube cylindrique de faible section circulaire, dans lequel est contenue la substance.

La différence de pressions tend à entraîner dans un mouvement d'ensemble le matériau, dans des pressions. Ce mouvement d'ensemble est contrarié par le frottement exercé par les parois du tube sur la couche de substance directement au contact, si bien que le matériau se décompose en couches cylindriques coaxiales (de même axe que l'axe du tube). Animées de vitesses différentes, la couche limite demeurant au repos.

Les rhéomètres type poiseuille fonctionnent parfois en position verticale. A la force de pesanteur qui est souvent suffisante pour provoquer l'écoulement, on peut surajouter une différence de pression aux extrémités de tube : nous établirons les équations de fonctionnement dans ce cas, très général, ou l'écoulement, vertical, est obtenu par la conjonction de l'action de la pesanteur et d'un gradient de pression. Nous distinguerons les différentes couches cylindriques du matériau par leur distance  $r$  à l'axe du cylindre. Nous noterons  $\tau(r)$  et  $\varepsilon(r)$  les contraintes et vitesses de cisaillement. Nous utiliserons d'autre part un axe vertical  $Oz$  orienté vers le haut pour repérer les hauteurs dans le tube cylindrique.

#### I.4.1.3 viscosimètres à chute de bille

Il est sans doute nécessaire d'achever cette première partie consacrée à l'étude des rhéomètres permanents par une présentation rapide du principe de fonctionnement du viscosimètre à chute de bille d'un emploi commode et rapide autre fois très répandu bien que ses possibilités soient très limitées il ne permet en effet l'étude que de liquides rigoureusement newtoniens.

Son principe de fonctionnement est très simple une sphère solide rigide, de rayon  $R$  et de masse volumique  $\rho_s$  tombe l'effet de la gravité dans le liquide newtonien étudié de masse volumique  $\rho$  et de coefficient de viscosité  $\eta$ .

Lorsque le régime permanent est atteint, la sphère a acquis une vitesse limite constante et la somme algébrique des forces est nulle :

$$6\pi\eta Rv = \frac{4}{3}R^3(\rho_s - \rho)g \quad (\text{I.16})$$

Soit encore :

$$\eta = \frac{2}{9v}gR^2(\rho_s - \rho) \quad (\text{I.17})$$

On voit, d'après cette relation, qu'il suffit pour déterminer  $\eta$  de mesure la vitesse limite de chute de la sphère.

### I.4.2 Rhéomètres à régime transitoire

Les rhéomètres à régime transitoire sont utilisés essentiellement pour déterminer le comportement viscoélastique des matériaux linéaires, aussi bien solide que liquide. Dans de tels rhéomètres on soumet l'échantillon à une sollicitation instantanée qui est maintenue constante et l'on étudie son comportement dans les instants qui suivent pendant un certain intervalle de temps qui précède l'établissement d'un régime permanent, le matériau manifeste un comportement dépendant du temps : l'étude de ce régime transitoire permet la détermination de ses propriétés viscoélastiques.

Il existe deux types de rhéomètres transitoires :

- les rhéomètres à fluage.
- les rhéomètres à relaxation.

#### I.4.2.1 Rhéomètres à fluage

Le fluage est une expérience au cours de laquelle une contrainte d'amplitude constante  $\varepsilon$  est appliquée à l'échantillon étudié à partir de l'instant initial  $t = 0$ .

La déformation de cisaillement correspondante  $\varepsilon(t)$  est mesurée pour un matériau linéaire, on peut alors déduire la fonction fluage  $f(t)$  :

$$f(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\tau} \quad (\text{I.18})$$

La connaissance de cette fonction fluage permet la détermination des propriétés viscoélastiques du matériau.

Un rhéomètre à fluage est donc capable :

- D'imposer à un instant donné une contrainte constante  $\varepsilon$  connue
- De mesurer la déformation de cisaillement correspondant  $\varepsilon(t)$  et d'en suivre l'évolution dans le temps.

Nous nous limiterons à la présentation des rhéomètres à fluage les plus répandus ce sont les rhéomètres rotatifs : cylindrique, à cône/plateau et à plateau/plateau.

Leur principe de fonctionnement est le suivant on applique à l'instant initial  $t=0$  un couple constant  $M$  au cylindre extérieur, au cône, ou au plateau supérieur, et l'on enregistre graphiquement la variation correspondante de l'angle de rotation  $\varnothing(t)$  du cylindre, du cône ou du plateau au cours du temps,  $M$  et  $\varnothing(t)$  sont donc les données expérimentales.

Comme nous venons de le voir, un rhéomètre transitoire à fluage doit être capable d'imposer au matériau des contraintes suffisamment faibles pour qu'il ait un comportement linéaire par voie

de conséquence, il doit être capable de mesurer des angles de rotation  $\varnothing(t)$  extrêmement petits les appareils perfectionnés, munis d'enregistreur graphique suffisamment sensible, sont capables d'apprécier une rotation d'angle  $10^{-5}$  radians (ce qui correspond à exténuement sophistiqué et par conséquent très coûteux. Ce type de rhéomètre est essentiellement destiné à étudier le comportement viscoélastique linéaire du matériau par l'analyse de sa fonction fluage  $f(t)$  et la déduction des paramètres caractériseront son élasticité instantanée et retardée.

#### I.4.2.2 Rhéomètres à relaxation

Traditionnellement une expérience de relaxation consiste à soumettre l'échantillon au repos à une déformation instantanée qu'on maintient constante et à enregistrer l'évolution des contraintes au cours du temps, l'analyse de la fonction relaxation fournit le spectre des temps de relaxation, ainsi que les modules de rigidité associés à chaque élément de Maxwell du modèle de Maxwell généralisé représentatif.

Il existe ainsi une dualité parfaite entre les expériences de fluage et de relaxation, l'échelon de contrainte étant remplacé par un échelon de déformation alors que les expériences de fluage ne peuvent être mises en œuvre que par des rhéomètres pilotes en contrainte, il faut faire appel à des rhéomètres pilotés en déformation pour réaliser les tests de relaxation, ces deux modes de pilotage étant exclusifs l'un de l'autre.

Les tests de relaxation présentent le même type d'avantages et de limites que les tests de fluage, en particulier :

- La facilité d'analyse pour un spectre de temps de relaxation discret, réduit et nettement différencié.
- La difficulté d'analyse dans le cas d'une distribution rapproché ou continue.
- L'impossibilité de caractériser les petits "temps" de relaxation.

#### I.4.3 Rhéomètres dynamiques (ou oscillants)

Dans les rhéomètres dynamiques, les échantillons étudiés sont soumis à des mouvements laminaires de cisaillement d'amplitude variant sinusoïdalement dans le temps.

On peut distinguer deux types d'appareils selon que le mouvement est entretenu ou non :

- Les rhéomètres à oscillations forcées qui peuvent fonctionner dans toute une gamme de fréquences ou à une seule fréquence particulière (rhéomètres résonants).
- Les rhéomètres à oscillations libres qui permettant de mesurer de faibles viscosités par l'étude de l'amortissement.

Pour des raisons de simplicité, nous présentons ces rhéomètres dans le cas où les forces appliquées imposent des mouvements de translation, dans la pratique, on rencontre assez souvent le cas où un couple induit un mouvement de rotation. La théorie étant très comparable, seuls les résultats seront donnés.

### **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les travaux sur la rhéologie, et les propriétés étudiées par la rhéologie. Dans le chapitre suivant, nous allons voir les différents types des fluides ioniques.

# Chapitre II

## Les liquides ioniques

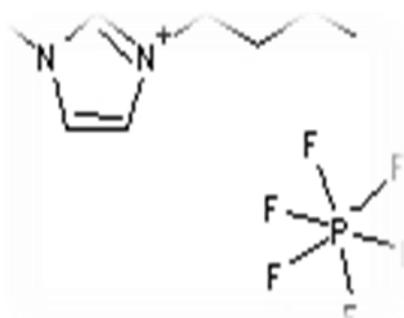
# Chapitre II

## Les liquides ioniques

### II.1 Généralités sur les liquides ioniques

#### II.1.1 Définitions

Les liquides ioniques sont des composés organiques entièrement constitués d'ions. L'appellation « liquide ionique » remonte au début des années 90. Afin de différencier ces nouvelles entités des sels fondus classiques, composés visqueux et corrosifs dont le point de fusion est beaucoup plus élevé, le chimiste K. Seddon utilise le terme « liquide ionique » pour désigner les sels organiques, liquides à température ambiante ou par extension dont la température de fusion est inférieure à 100 °C (*figure a*) [17].

*a**b*

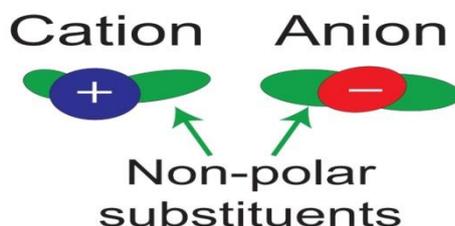
**Figure II.1.** Composition des fluides ioniques

Les liquides ioniques sont constitués d'un cation organique et d'un anion organique ou inorganique (*figure b*). Les cations les plus fréquemment rencontrés sont les *N,N*-dialkylimidazoliums, les alkylammoniums, les alkyipyridiniums et les alkylphosphoniums auxquels

divers anions inorganiques (I, Cl, Br, PF<sub>6</sub>, NTf<sub>2</sub>) ou Organiques (triflate, tosylate, acétate...) sont associés. La grande diversité de Combinaisons permet d'avoir accès à des liquides ioniques « sur mesure » dont

Les propriétés physico-chimiques peuvent être modulées pour une application Donnée [17].

Cation et anion :

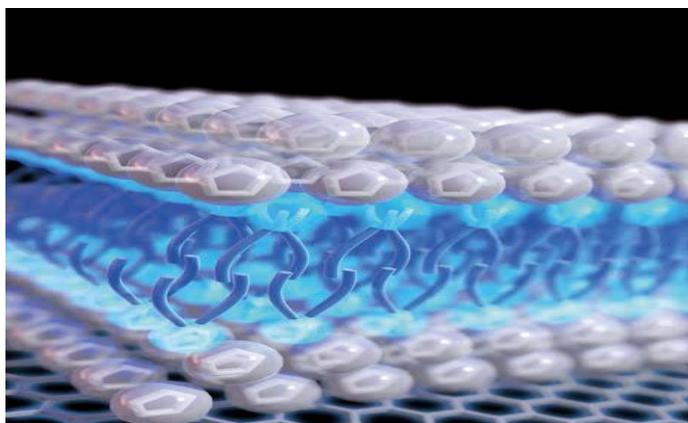


*Figure II.2. Cation et anion*

Un **cation** est un ion qui, ayant perdu un ou plusieurs électrons, porte une ou plusieurs charges électriques positives : à l'inverse, un anion contient plus d'électrons que de protons. On l'appelle ainsi car il est attiré, lors d'une électrolyse, par l'électrode négative, nommée cathode, de la même façon que les pôles de charges opposées des aimants s'attirent. Par exemple, l'ion sodium, noté Na<sup>+</sup>, est l'atome de sodium ayant perdu un électron.

Un **anion** est un ion qui, ayant gagné un ou plusieurs électrons, porte une ou plusieurs charge(s) électrique(s) élémentaire(s) négative(s) : par exemple, l'ion chlorure Cl<sup>-</sup> est l'atome de chlore ayant gagné un électron. À l'inverse, un cation contient moins d'électrons que de protons.

On l'appelle ainsi car lors d'une électrolyse, cet ion est attiré par l'électrode positive nommée anode, de la même façon que les pôles de charges opposées des aimants s'attirent.

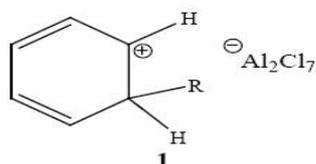


*Figure II.3. L'autoassemblage en couches de liquides ioniques [17].*

### II.1.2 Historique

Le premier liquide ionique, le nitrate d'éthylammonium, fut synthétisé par Walden et al. en 1914 durant la première guerre mondiale, en cherchant de nouveaux explosifs [18]. A cette époque, les scientifiques ont porté peu d'intérêt à cette découverte et ce n'est que Quarante ans plus tard que le premier brevet faisant apparaître les Lis fut déposé [19]. Les chloro aluminates la première génération de LIs. Durant les années 1970 et 1980, ces LIs ont été utilisés principalement dans le domaine de l'électrochimie. Ce fut Une importante avancée, cependant les liquides basés sur des chloro aluminates, qu'ils Soient constitués de cations constituent pyridinium ou de cations imidazolium, sont très sensibles à L'eau et s'hydrolysent. Une étape supplémentaire fut de préparer des LIs stables à l'air, Qui soient simples à préparer et sans précautions particulières. En 1992, Wilkes et al. Ont Publié la préparation du 1-éthyl-3-méthylimidazolium tétra fluoroborate, liquide ionique Correspondant à ces conditions [20].

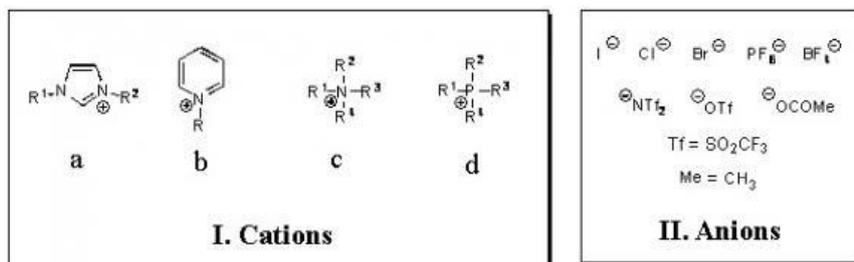
Le premier liquide ionique recensé date du milieu du 19<sup>ème</sup> siècle ; il apparaissait sous forme d'une huile rouge lors de la préparation du toluène à partir du benzène par réaction de Friedel et Crafts (réaction du benzène sur le monochlorométhane en présence de  $\text{AlCl}_3$  (Trichlorure d'aluminium) ; sa structure :



**Figure II.4.** Structure chimique de Trichlorure d'aluminium

Le premier liquide ionique synthétisé le fut en 1914 pendant la première guerre mondiale par Walden et ses collaborateurs qui cherchaient de nouveaux explosifs : le nitrate d'éthyl ammonium (température de fusion : 12°C).

Il a fallu attendre les années 1960-70 pour que des recherches soient faites dans ce domaine par l'armée américaine qui voulait améliorer les caractéristiques des électrolytes des piles thermiques elles ne furent pas couronnées de succès.



**Figure II.5.** Structure des principaux cations et anions rencontrés dans les liquides ioniques. Les symboles  $R$ ,  $R^1$  à  $R^4$  représentent des chaînes carbonées du type  $CH_3$  ou  $CH_3-CH_2$ , [21].

## II.2 Propriétés physicochimiques

La température de fusion ou les propriétés de solubilité d'un liquide ionique dépendent à la fois du cation et de l'anion. En faisant varier le cation ou l'anion, il est possible d'obtenir un solvant présentant les propriétés désirées.

- Les liquides ioniques possèdent de très bonnes propriétés de dissolution pour la plupart des composés organiques et inorganiques.
- Ils sont stables à haute température
- Ils ont une pression de vapeur quasiment nulle
- Ils sont non-inflammables (à l'exception de toute une classe de liquides ioniques dit "énergétiques", composés d'anions nitrate ou picrate, par exemple).
- Des études physiques (infrarouge, Raman, diffraction de neutrons, résonance magnétique nucléaire, diffraction de RX), ainsi que des calculs théoriques (dynamique moléculaire), ont montré que les liquides ioniques possèdent une auto-organisation prononcée. Bien qu'il s'agisse de liquides, ils possèdent un caractère "vitreux", et possèdent des hétérogénéités à l'échelle microscopique (à l'échelle de  $\sim 0,1$  nm). On y rencontre des régions très polaires (comparable à de l'eau) ainsi que des régions apolaires (comparables à des solvants organiques). D'autre part, cette organisation explique la haute conductivité ionique de ces solvants et justifie leur emploi en tant qu'électrolyte.
- Ils peuvent interférer avec le vivant, et on a récemment pu exacerber leur forte activité biologique, ce qui a intéressé des biochimistes, des écologistes et des scientifiques du domaine médical et pharmaceutique ; leur toxicité laisse entrevoir des propriétés

antimicrobiennes et cytotoxiques susceptibles d'intéresser la médecine. Un nouveau concept de principe actif liquide-liquide ionique (API-IL) est envisagé, où des médicaments traditionnels pourraient être présentés en espèce liquide ionique (pharmacie liquide ionique) [22].

### II.2.1 Densité

La connaissance de la densité est essentielle pour mieux appréhender le comportement des Espèces dans différents procédés. Dans le cas des LIs, cela permet d'estimer des paramètres tels que leurs rendements dans des procédés de séparation de phase comme les extractions liquide-liquide [23]. Les LIs possèdent le plus souvent une densité supérieure à celle de l'eau, qui est située dans un intervalle de [1,05-1,65] g/cm<sup>3</sup> à température ambiante. En général, la densité des LIs aura tendance à diminuer à mesure que l'on augmente la température et le poids moléculaire de ces derniers.

*Tableau II.1. Densité de quelques ioniques [23]*

	Densité (g.cm <sup>-3</sup> )
<b>BMIMPF<sub>6</sub></b>	1.368
<b>BMMIMPF<sub>6</sub></b>	1.363
<b>BMIMBF<sub>4</sub></b>	1.12
<b>BMMIMBF<sub>4</sub></b>	X
<b>EMIMNTf<sub>2</sub></b>	1.519
<b>BMIMNTf<sub>2</sub></b>	1.436
<b>HMIMNTf<sub>2</sub></b>	1.372
<b>OMIMNTf<sub>2</sub></b>	1.320
<b>DMIMNTf<sub>2</sub></b>	1.271
<b>BBIMNTf<sub>2</sub></b>	X
<b>BMMIMNTf<sub>2</sub></b>	1.421

### II.2.2 Point de fusion

Le critère clé pour l'évaluation d'un liquide ionique est, par définition, son point de fusion. Un sel fondu est défini liquide ionique lorsque son point de fusion est inférieur à 100°C. Le point de fusion est difficile à corréler avec la composition chimique. Les principaux facteurs qui influencent le point de fusion des liquides ioniques sont : la distribution de charge sur les ions, la possibilité de liaisons hydrogène, la symétrie des ions et les interactions de Van der Waals.

### II.2.3 Viscosité

La viscosité des LIs est en générale plusieurs fois supérieure à celle des solvants organiques classiques. Cette caractéristique est expliquée par leur tendance à former des liaisons hydrogènes, ainsi que par les importantes forces d'interactions de Van Der Waals qui les caractérisent [25]. À titre indicatif, la viscosité des solvants organiques conventionnelles varie à température ambiante entre [0,2-10 cPo] [26] alors que celle des LIs varie entre [10-1400 cPo] [27]. La viscosité a une tendance à augmenter à mesure que les chaînes alkyles portées par le cation seront longues, alors qu'elle est inversement proportionnelle à la taille de l'anion [28]. Il est à noter que la viscosité diminue à mesure que l'on élève la température [26].

La viscosité élevée des liquides ioniques est certainement un facteur important mais insuffisant pour expliquer les valeurs élevées de chute ohmique. Une association importante des ions constitutifs du liquide et une forte structuration du milieu devraient également être prises en compte : l'introduction d'eau détruirait ces associations, ce qui abaisserait la valeur de la chute ohmique. Nous ne retiendrons que les valeurs de chute ohmique des liquides ioniques étudiés sont élevées, comparées à celles des sels fondus classiques à haute température mais comparables à celles des solvants moléculaires contenant un sel fondu. Les valeurs de chute ohmique mesurées ne sont pas pleinement compatibles avec le sens généralement entendu des sels fondus, à savoir des ions totalement dissociés. L'ordre de grandeur des valeurs de chute ohmique mesurées sont caractéristiques d'un solvant peu dissocié (paires d'ions) d'une organisation moléculaire forte (intervention de liaisons hydrogène cations-anions) et d'une désorganisation interne due à l'eau, favorisant la dissociation. Enfin l'effet de diminution de la chute ohmique lorsque la teneur en eau augmente met en valeur le rôle très important de l'eau dans ces milieux. La teneur en eau des liquides ioniques sert d'indicateur des paramètres physico-chimiques et électrochimiques.

### II.2.4 Solubilité et solvation

Les LIs ont une capacité de solubiliser une large gamme de composés organiques et même inorganiques [28]. Il est difficile d'établir une règle générale pour la solubilité/miscibilité des LIs, cela dépendra grandement de la nature exacte des cations et surtout des anions comme on peut. Dans des milieux conventionnels, la polarité est utilisée pour déterminer "le pouvoir de solvation", à l'aide de grandeurs physiques telles que la permittivité relative  $\epsilon$  le moment dipolaire  $\mu$ . Les liquides ioniques ne possédant pas de moment dipolaire bien défini, ce critère est inapproprié pour ce type de solvant. Pour pallier ce problème, les études portant sur la polarité des LIs ont employé diverses échelles de polarité relative. Pour ce faire, les caractéristiques de

fluorescence d'une sonde (en général une molécule organique) dissoute dans le liquide ioniques ont comparées à celles obtenues dans d'autres solvants connus. La Conclusion de ces études est que les LIs sont des solvants polaires avec une polarité proche de Celles des alcools à courte chaîne [29] [30] [31]. Les liquides ioniques 1-méthyl-3-alkylimidazolium Présentent une polarité similaire à l'éthanol ou au méthanol [32].

$\epsilon_r$ :permittivité relative

$\mu$ :momentdipolaire

- a) Solubilité dans l'eau
- b) Solubilité dans des solvants organiques
- c) Stabilité électrochimique

La stabilité électrochimique d'un électrolyte définit son domaine d'utilisation en potentiel, Appelé fenêtre électrochimique ou domaine d'électro activité (DEA). C'est une propriété primordiale des électrolytes pour leur utilisation dans des procédés mettant en jeu des réactions électrochimiques. La large fenêtre électrochimique des liquides ioniques en fait des solvants intéressants pour de nombreuses applications, telles que l'électrodéposition.

### II.2.5 Stabilité chimique

La stabilité chimique est souvent mise en avant comme un des principaux avantages des LIs. Cependant, en y regardant de plus près il a été constaté que bon nombre de LIs pouvaient subir des Transformations chimiques suivant les conditions expérimentales. La manipulation des liquides ioniques dépend essentiellement de la stabilité de l'anion vis-à-vis de l'hydrolyse.

La pureté des liquides ionique est aussi très importante pour le déroulement des réactions. Les liquides ioniques ne peuvent être distillés et doivent donc être synthétisés de manière la plus pure. Le constant diélectrique d'un solvant ionique ne peut être mesurée. Les liquides ioniques peuvent être stockés pendant une longue période sans décomposition et sont hautement polaires.

Selon Wang & al; (2017) leur stabilité ne doit pas être surestimée ; et ces produits devraient être manipulés avec précaution.

### II.3 Caractérisation des liquides ioniques présélectionnés

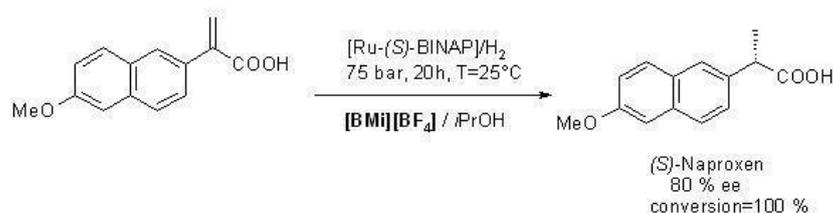
L'étude bibliographique a permis de réduire le nombre de liquides ioniques potentiellement utilisables pour le procédé à 12 candidats. Cette partie du manuscrit concerne la caractérisation physique et électrochimique de ces LIs : densité, viscosité et caractère hygroscopique. L'influence sur ces propriétés de la nature de l'anion a été étudiée pour les LIs à cation imidazolium. L'influence

de la nature du cation a été étudiée pour trois anions différents : SCN<sup>-</sup>, TFSI<sup>-</sup> et OTf<sup>-</sup>. Enfin, l'influence de la longueur de la chaîne alkyle latérale portée par le cation imidazolium a été étudiée avec l'anion chlorure.

### II.3.1 Solvants pour la catalyse et la synthèse organique

Les liquides ioniques sont utilisés comme solvants dans différentes réactions telles que les alkylations de Friedel-Craft, les couplages C-C, les cycloadditions de Diels-Alder, les réactions d'hydrogénation, d'oxydation ou encore les réactions de Heck. Ils permettent d'optimiser les procédés en obtenant une meilleure sélectivité et en augmentant le rendement.

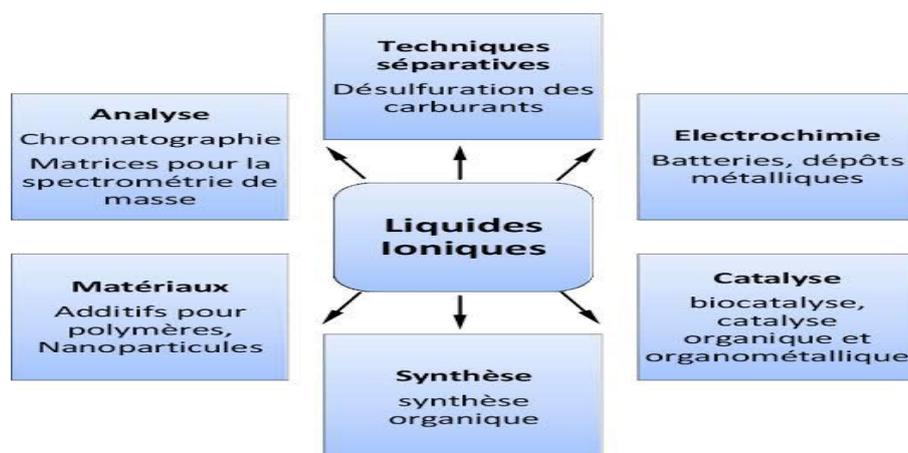
Le caractère recyclable est une des particularités les plus attrayantes des liquides ioniques. Dans certaines réactions, le système catalytique (liquide ionique + catalyseur) peut être facilement recyclé optimisant ainsi la durée de vie du catalyseur [41].



*Figure II.6. Schéma de la réaction de synthèse du liquide ionique*

### II.4 Applications des liquides ioniques

Les liquides ioniques sont couramment utilisés comme solvants verts et puissants et comme fluides électro conducteurs. Leurs autres applications se font dans le domaine de la chimie organique, l'électrochimie, la catalyse, la chimie physique, les sciences de la vie et science des matériaux, néanmoins les principales applications seront décrites dans cette section.



*Figure II.7. Applications des liquides ioniques.*

#### II.4.1 Synthèse organique

Comme indiqué dans la précédente section, les LIs possèdent des propriétés Physicochimiques très particulières et facilement modulables qui en font d'excellents candidats pour des utilisations en tant que solvants/catalyseurs. On retrouve globalement trois applications majeures des LIs en synthèse organique, ceci dépend essentiellement de la nature de ces derniers [41].

La synthèse organique est une branche de la synthèse chimique qui est concernée par la création de composés organiques à l'aide de réactions organiques. Les molécules organiques ont souvent un degré de complexité plus élevé que celles dites inorganiques. De nos jours, la synthèse organique occupe une place importante en chimie organique. À l'intérieur de celle-ci, on distingue deux principaux champs de recherche : la synthèse totale et la méthodologie.

##### II.4.1.1 Solvants de synthèses

L'utilisation de LI en tant que solvants de réactions catalytiques a fait l'objet de nombreuses études au cours des trois dernières décennies [42]. Il sera ici question uniquement d'applications en tant que solvants inertes (voir tout au plus en tant que co-catalyseurs). Les LIs représentent une excellente alternative aux solvants organiques classiques notamment dans des réactions de catalyse impliquant des métaux de transition. En effet, en plus de l'aspect bénéfique au niveau environnemental et de toxicité, les LIs fournissent également un milieu polaire et peu coordonné qui leur octroie une remarquable capacité de solvation ce qui favorise grandement ce type de réaction [43].

#### II.4.1.2 Catalyseurs homogènes supportés

Des premiers “simples” LIs à base d’anion halogéné-aluminate aux LIs chiraux à structure complexe, l’utilisation des LIs en tant que catalyseurs homogènes en synthèse organique a fait un chemin considérable. Il ne s’agit plus de considérer les LIs comme des solvants inertes dont le seul rôle se limite à fournir un milieu hautement polaire, mais d’également les voir comme des espèces réactives à part entière.

#### II.4.1.3 Catalyseurs hétérogènes supportés

Les LIs dans ce cas sont immobilisés sur un support solide poreux. Ces LIs sont plus communément appelés SILP (Supported ionic liquids phase). Leur immobilisation peut se faire soit ;

- Par des liaisons chimiques entre le cation et l’anion du LI et le support solide.
- Par imprégnation du LI à travers une physisorption qui fixerait ce dernier sur le support Solide.

#### II.4.2 Électrochimie

L’électrochimie est la discipline scientifique qui s’intéresse aux relations entre la chimie et l’électricité. Elle décrit les phénomènes chimiques couplés à des échanges réciproques d’énergie électrique. Il n’est de constater au vu des remarquables propriétés électrochimiques que présentent les LIs, notamment leur importante conductivité électrique ainsi que leur vaste fenêtre électrochimique, qu’ils ont ouvert la voie à de nombreuses applications dans le domaine de l’électrochimie [41].

- a. Électrodéposition métallique
- b. Stockage d’énergie

## c. Capteurs et biocapteurs électrochimiques

Forme chimique	Cation ou anion de grande taille
Température de fusion	En dessous de 100 °C
Domaine d'existence liquide	Généralement de l'ordre de 200 °C
Stabilité thermique	Haute
Viscosité	Inférieure à 100 mPa.s-1 (cP)
Constante diélectrique	Inférieure à 30
Polarité	Modérée
Conductivité spécifique	Inférieure à 10 mS.cm-1
Fenêtre électrochimique	Supérieure à 2 V
Pression de vapeur	Négligeable

*Figure II.8. Principales caractéristiques des liquides ioniques.*

## II.5 Conclusion

Les LIs sont des liquides formés généralement par un cation organique volumineux et un anion organique ou inorganique et ayant une température de fusion inférieure à 100°C. et les propriétés physico chimiques, la stabilité thermique, stabilité électrochimique.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la partie expérimentale, cette étape est nécessaire avant de passer à la présentation de nos résultats dans le dernier chapitre.

# Chapitre III

## Partie expérimentale

# Chapitre III

---

## Partie expérimentale

---

### III.1 Fluides étudiés

Notre travail expérimental effectué au sein de Laboratoire de Recherche : Fluides Industriels Mesures et Application, « FIMA » de l'université de Djilali Bounaama de Khemis Miliana. Limité par le peu de temps que nous avons eu était surtout basé sur la caractérisation Rhéologique des liquides ioniques.

Les liquides ioniques testés dans le cadre de cette partie sont réalisés à l'aide du rhéomètre MCR (modular compact rheometer) 302 fabriqué par ANTON PAAR.

### III.2 Travail Expérimental

Les viscosités se déterminent selon divers principes de mesures et à l'aide des différents appareils. Les substances susceptibles de s'écouler, se caractérisent non seulement par leurs valeurs de viscosité mais avant tout leurs comportements spécifiques à l'écoulement. La conception d'un rhéomètre rotatif, permet la mise en évidence de toutes les propriétés propres à l'écoulement.

Ces rhéomètres sont utilisés pour les contrôles de la qualité, le Génie chimique et les travaux de recherche et de développements.

Dans cette partie nous sommes en train de proposer et décrire la chaîne de mesures qui nous ont servi à examiner un certain nombre de fluides. Le rhéomètre à cylindres coaxiaux utilisé est celui de laboratoire de recherche

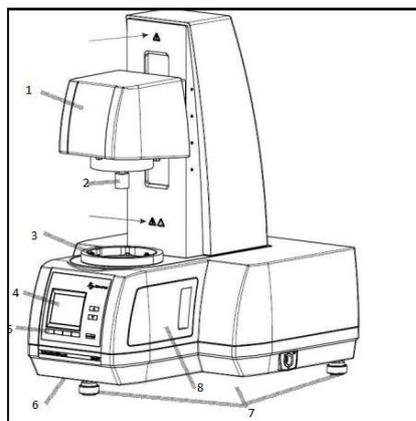
### III.3 Présentation du dispositif expérimentale et mode opératoire

#### III.3.1 Description du MCR 302



*Figure III.1. Rhéomètre Modulaire Compact 302*

La série des rhéomètres compacts et modulaires MCR (Modular Compact Rheometer) Intègre un moteur EC et est adaptée à une large gamme d'opérations de mesure. Un système de contrôle de la température et des accessoires spécifiques à l'échantillon permet d'adapter L'instrument à l'application souhaitée. Le logiciel du rhéomètre, avec le Tool master (système de reconnaissance et de configuration automatique), offre une interface utilisateur conviviale. Tous les éléments de commande mécanique et électriques on t'incorporés dans une Unité unique. La tête de mesure amovible assure un espace suffisant pour le chargement et le réglage de l'échantillon. La figure ci-dessous représente la vue d'ensemble du rhéomètre MCR.



*Figure III.2. MCR en vue d'ensemble.*

- 1 : tête de mesure MCR.
- 2 : Fixation pour système de mesure.
- 3 : Bride circulaire : alignement mécanique automatique de tous les accessoires.
- 4 : Ecran couleur.
- 5 : Touche de fonction.
- 6 : Poignée encastrée.
- 7 : Trois pieds réglables.
- 8 : Capot latéral droit.

Les systèmes de mesures MCR D'ANTON PAAR peuvent être utilisés avec tous les dispositifs de température et sont interchangeables dans leurs catégories d'accessoires respectifs.



*Figure III.3. Système de mesure côté*

### III.3.2 Mode de fonctionnement

Le rhéomètre MCR peut être utilisé dans deux modes différents :

#### 1. Mode hors ligne

Le voyant vert sur le panneau de commande est atteint. Le MCR peut être commandé à l'aide des boutons situés sur le panneau de commande.

#### 2. Mode on ligne

Le voyant vert sur le panneau de commande est allumé. Le MCR peut être commandé à distance au moyen du logiciel installé sur un PC.

Dans ce mode, on peut arrêter le déplacement de la tête de mesure en appuyant sur l'un des boutons du panneau de commande.

### III.3.3 Raccordement d'un bain à circulation

On doit utiliser un bain à circulation pour le contrôle de la température d'un dispositif de température ou pour le refroidissement à contre-courant d'un dispositif de température, en

particulier les systèmes à effet Peltier. Pour connaître les spécifications requises.

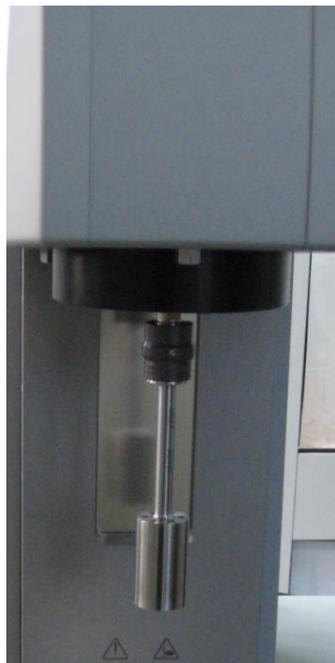


**Figure III.4.** Bain à circulation du MCR.

Pour vérifier si le bain à circulation fonctionne correctement et si le fluide circule, il est recommandé d'installer l'indicateur de débit fourni. Pour cela, avant de raccorder les tuyaux, couper le tuyau provenant de l'entrée « circulator IN » sur le MCR à l'endroit où l'indicateur de débit sera clairement visible à tout moment.

### III.3.4 Montage de système de mesure

Anton paarGmbhoffreune large gamme de systèmes de mesure.



**Figure. III.5.** Système de mesure monté.

Les étapes à suivre pour le montage du système de mesure sont les suivantes :

1. Déplacer le manchon du couple MCR vers le haut.
2. Tourner le couple jusqu'à ce que le repère apposé dessus concorde avec celui situé sur le système de mesure.
3. Insérer le système de mesure dans le couple du MCR.
4. Abaisser le manchon du couple du MCR pour fixer le système de mesure.

Pour retirer le système de mesure, tenez-le d'une main, puis pousser le manchon du couple de MCR vers le haut. Enlever alors le système de mesure avec précaution.

Le montage d'un débitmètre peut être nécessaire pour contrôler le débit d'air afin d'assurer la répartition optimale de la température dans l'échantillon.

### III.3.5 Raccordement au PC



*Figure III.6. MCR 302 raccordé à un PC.*

Pour installer le logiciel sur le PC, insérer le CD d'installation et suivre les instructions à l'écran.

#### III.3.5.1 Sélection du paramètre de communication

- a) Mettre l'instrument sous tension et attendre que la procédure de démarrage se termine.
- b) Appuyer sur le bouton « on line » une fois pour activer le mode hors ligne (voyant vert éteint), puis sur « menu » et « enter » pour accéder au menu « select connexion ». L'option active est repérée par une flèche. Pour changer le paramètre, utiliser les boutons fléchés du panneau de commande.

- c) Lorsque la sélection est effectuée, appuyer sur « enter » et attendre que l'instrument termine l'enregistrement des réglages.
- d) Appuyer sur « menu » pour revenir à l'écran par défaut.
- e) Appuyer sur « online » pour revenir au mode en ligne.
- f) Mettre l'instrument hors tension pour connecter les câbles.

### III.3.6 Utilisation du rhéomètre MCR

#### III.3.6.1 Mise sous tension de l'instrument

Lorsque le raccordement des tuyaux et des câbles est fini, mettre le MCR sous tension à l'aide de l'interrupteur principal situé sur le côté gauche. Les propriétés physiques telles que la force normale, la température et l'entrefer sont affichées à l'écran. La ligne inférieure de l'écran présente les fonctions pouvant être exécutées à l'aide de la touche de fonction affichée en dessous.



*Figure III.7. Ecran du MCR*

#### III.3.6.2 Panneau de commande MCR

Le panneau de commande situé sur la face avant de l'instrument se compose de l'écran, quatre touches de fonction, des boutons haut et bas, et bouton « online ». La fonction attribuée aux quatre touches de fonctions peut varier en fonction de l'état de fonctionnement courant. La fonction active est toujours affichée sur la ligne inférieure de l'écran.

- a) Lorsque la sélection est effectuée, appuyer sur « enter » et attendre que l'instrument termine l'enregistrement des réglages.
- b) Appuyer sur « menu » pour revenir à l'écran par défaut.
- c) Appuyer sur « online » pour revenir au mode en ligne.
- d) Mettre l'instrument hors tension pour connecter les câbles

### III.3.6 Utilisation du rhéomètre MCR

#### III.3.6.1 Mise sous tension de l'instrument

Lorsque le raccordement des tuyaux et des câbles est fini, mettre le MCR sous tension à l'aide de l'interrupteur principal situé sur le côté gauche. Les propriétés physiques telles que la force normale, la température et l'entrefer sont affichées à l'écran.

La ligne inférieure de l'écran présente les fonctions pouvant être exécutées à l'aide de la touche de fonction affichée en dessous.



*Figure III.8. Ecran du MCR.*

#### III.3.6.2 Panneau de commande MCR

Le panneau de commande situé sur la face avant de l'instrument se compose de l'écran, quatre touches de fonction, des boutons haut et bas, et bouton « online ». La fonction attribuée aux quatre touches de fonctions peut varier en fonction de l'état de fonctionnement courant. La fonction active est toujours affichée sur la ligne inférieure de l'écran.



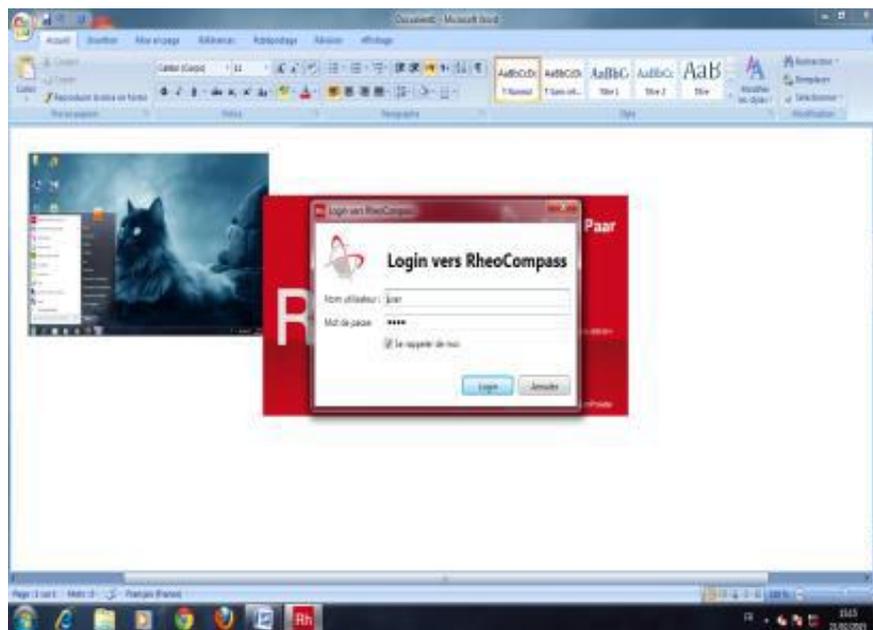
*Figure III.9. Panneau de commande du MCR 302.*

### III.3.6.3 Exécution d'une mesure

Les mesures ne peuvent être réalisées qu'à l'aide d'un PC sur lequel est installé le logiciel du rhéomètre. Pour utiliser l'instrument, son installation doit avoir été réalisée conformément aux instructions fournies dans le manuel. Les accessoires et le logiciel du rhéomètre doivent également être installés.

### III.3.7 Démarrage et initialisation du MCR 302

1. Pour démarrer l'instrument, mettre le sous tension. Attendre que l'instrument démarre (environ 5 minutes). L'instrument est prêt lorsque « Status : OK » s'affiche sur la première ligne.
2. Démarrer l'ordinateur et son système d'exploitation, puis lancer le logiciel du rhéomètre.



*Figure III.10. Lancement du logiciel du MCR.*

3. Mettre en marche les accessoires, un contrôleur de température externe ou un bain à circulation, un compresseur (lorsqu'il atteint 6 bars environ).



**Figure III.11.** Compresseur lié à MCR 302.

4. Initialiser l'instrument à partir du logiciel pour établir la communication. Pendant l'initialisation, la tête de mesure se déplace vers la position supérieure pour vérifier le capteur d'entrefer. Le rotor exécute plusieurs rotations à grande vitesse pour vérifier le capteur de position. Si c'est un démarrage pour la première fois : déterminer le moment d'inertie du système de mesure utilisé. Ces deux procédures sont décrites dans le manuel des pilotes de périphériques pour la série MCR xx2.
5. Si ce n'est pas le premier démarrage, on passe à l'étape de la mesure.
6. Envoyer la température requise à l'accessoire et monter le système de mesure. Pour les systèmes à cylindre, régler la position de mesure et attendre que l'équilibre thermique soit atteint. Pour les systèmes de mesure nécessitant un entre fer zéro, démarrer la procédure de réglage de l'entrefer zéro et régler la position de mesure une fois cette procédure terminée.

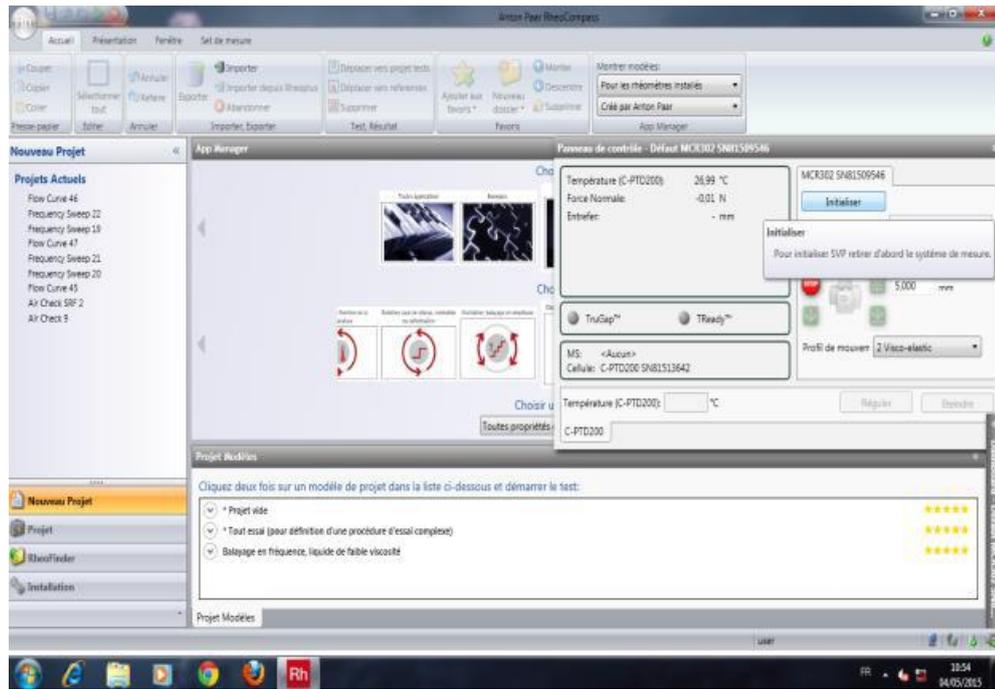


Figure III.12. Exploitation du logiciel dans le réglage du MCR.

7. Configurer les paramètres de mesure selon les instructions du manuel du logiciel, les étapes sont les suivantes :

1) Choix de type de test (nouveau projet) :

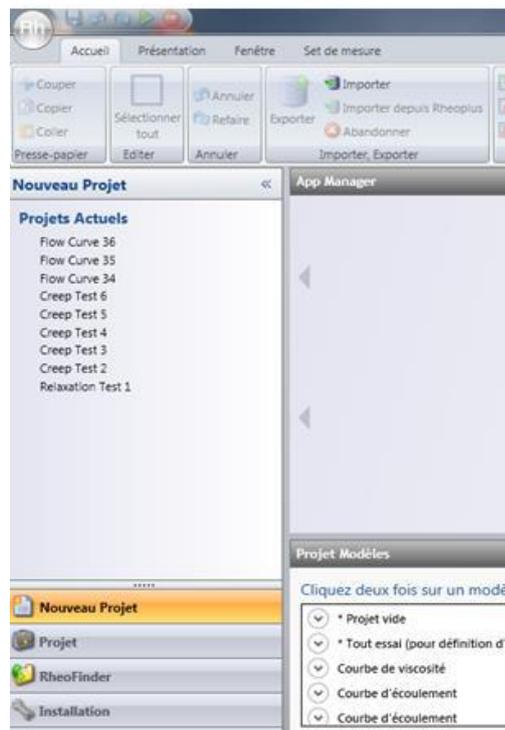
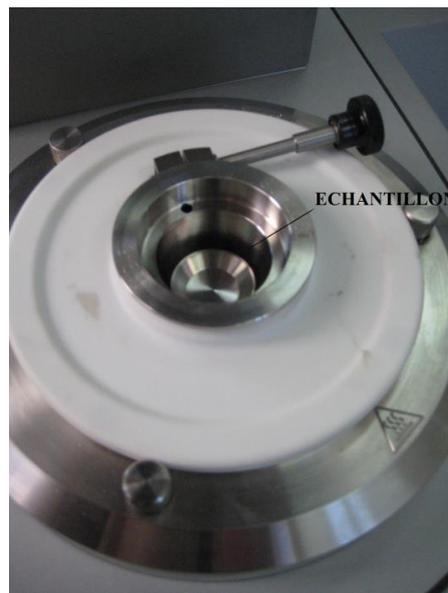


Figure III.13. Choix de type de test pour la mesure

- 2) Initialiser la position de la tête :
- 3) Remonter la tête à 60 mm :
- 4) Déplacer la tête de l'instrument vers le haut et charger l'échantillon.
- 5) Déplacer la tête vers la position de réglage (systèmes de mesure plan parallèle et cône plan), régler l'échantillon, puis déplacer la tête de mesure vers la position de mesure. Pour les systèmes à cylindre, régler la position de mesure directement.
- 6) Placer la géométrie convenable au test.
- 7) Initialiser la force normale.
- 8) Régler le gap zéro
- 9) Régler la température.
- 10) Pour l'ajustement du moteur de l'appareil, faire le test Air check une fois chaque trois Mois.
- 11) Redescendre la géométrie à l'entre fer zéro.
- 12) Faire entrer le nom de test ainsi que les détails (informations importantes); ensuite continuer.
- 13) Attendre que l'équilibre thermique soit atteint et démarrer la mesure.
- 14) Après la mesure, déconnecter le système de mesure et déplacer la tête de l'instrument vers le haut.
- 15) Retirer l'échantillon et nettoyer les systèmes de mesure supérieure et inférieure
- 16) Remonter le système de mesure pour procéder à la mesure suivante. La configuration des paramètres de mesure et l'analyse des données rhéologiques dépendent fortement de l'échantillon et du type de mesure sélectionné. Pour approfondir, il est recommandé de lire l'ouvrage « RHEOLOGY HANDBOOK » de Thomas Mezger.

### III.3.8 Chargement de l'échantillon

La quantité et le traitement de l'échantillon pendant le chargement sont les deux principaux facteurs pour garantir l'exactitude et la reproductibilité des résultats de mesure rhéologique.



**Figure III.14.** Echantillon mis en place du MCR.

La plupart des matériaux étant sensibles aux forces extérieures. Il est essentiel que les échantillons soient traités de la manière la plus similaire possible avant la mesure. Ils doivent être appliqués avec précaution au système de mesure pour éviter toute incidence sur les résultats.

Le volume d'échantillon nécessaire pour chaque système de mesure est indiqué dans le Logiciel Rhéoplus (pour plus d'informations, reporter au manuel d'utilisation « Rheoplus Software-volume 2-Reference », chapitre « Editing or creating a measuring system »).



**Figure III.15.** Un rhéomètre MCR 302 mis en marche

En arrivant à ce point, le MCR est mis en marche et prêt à donner les résultats du travail demandé.

Chapitre IV

Analyse et interprétations  
des résultats

# Chapitre IV

## Analyse et interprétations des résultats

### IV.1 Introduction

Notre travail expérimental a pour objectif l'étude du comportement rhéologique, le liquide ionique utilisé est 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate  $\geq 95$  % HPLC H-NMR, commercialisé par la compagnie SIGMA-ALDRICH. Ce liquide ionique a la formule  $C_7H_{11}N_3S$ , et sa masse molaire est 129.25 g/mol.

Cette étude nécessite la connaissance des paramètres rhéologiques et comportement ainsi que l'effet de la température sur les paramètres rhéologiques.

Les essais de charge et de décharge fait pour les mêmes gradients de vitesse, donne presque une même valeur de la contrainte de cisaillement. Ce résultat est valable pour tous les essais, et montre que le phénomène d'hystérésis est très faible, la représentation des courbes de décharge n'est pas donc nécessaire.

### IV.2 Résultats obtenus à l'aide du rhéomètre MCR 302

#### IV.2.1 La courbe d'écoulement

Les fluides newtoniens et non newtoniens ont des comportements rhéologiques complètement différents. Lorsque la contrainte varie linéairement avec le taux de déformation à température constante, la constante de proportion étant la viscosité, les fluides sont newtoniens.

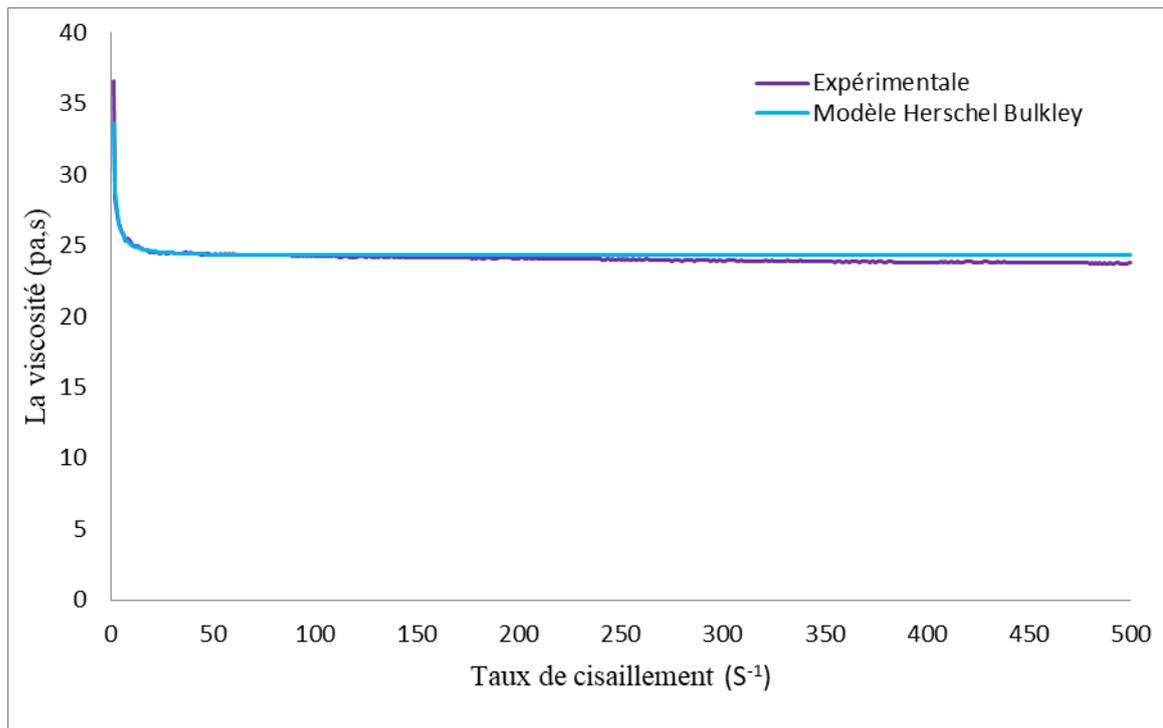
Quand les fluides ne suivent pas ce simple comportement, ils sont classés comme non newtoniens. Il n'y a pas de consensus quant aux modèles mathématiques appropriés pour le comportement à l'écoulement des liquides ioniques, car aucune étude détaillée n'a été rapportée dans la littérature de construction, pour ce type de fluide.

Pour décrire le comportement rhéologique du 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate, des tests ont été effectués pour des taux de cisaillement de 1 à 500  $s^{-1}$  suivant les procédures décrites ci-dessus. Tous les tests ont été menés à une température ambiante (23.15°C). Les points de

données ont été équipés du modèle Herschel Bulkley, qui s'exprime comme suit :

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (\text{IV.1})$$

Dans l'équation (1), Avec :  $\tau_0$  : Contrainte seuil (Pa), K : Indice de consistance (Pa.sn), n : Indice d'écoulement. Si  $n = 1$ , le système est fluide newtonien, la viscosité apparente varie peu avec la vitesse de cisaillement ; si  $n > 1$ , le système est fluide dilatant, la viscosité augmente avec l'augmentation apparente du taux de cisaillement ; si  $n < 1$ , le système est fluide pseudo plastique, la viscosité apparente diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement.

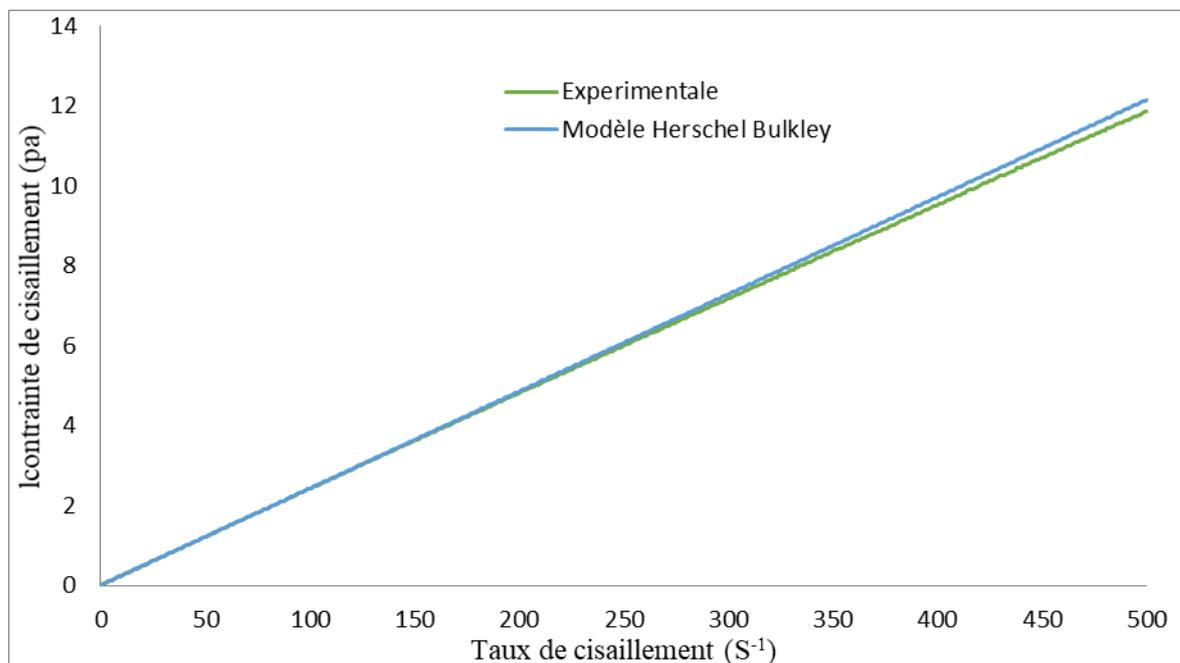


**Figure IV.1.** La variation de la viscosité de 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate en fonction du taux de cisaillement, expérimentale et par modèle Herschel Bulkley

Pour donner une meilleure présentation de la dépendance au cisaillement du liquide étudié, la variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement a été montrée sur la figure IV.1. Le premier régime, à faible taux de cisaillement ( $\dot{\gamma} < 30 \text{ s}^{-1}$ ): le liquide étudié est de fluide non newtonien dans cette plage spécifique de taux de cisaillement (cela se produit lorsque la viscosité dépend du taux de cisaillement). Le comportement non newtonien est montré par la non-linéarité entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement appliqué (La contrainte de cisaillement ne dépendait pas linéairement des valeurs de taux de cisaillement). La viscosité du LI a diminué avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement dictant le comportement d'amincissement par cisaillement (c'est un fluide pseudo plastique). La diminution de la viscosité pourrait être due à la

rupture des unités structurales dans le LI en raison des forces hydrodynamiques générées au démarrage de cisaillement.

Le deuxième régime, à taux de cisaillement élevé ( $\gamma > 30 \text{ S}^{-1}$ ): On voit que la contrainte de cisaillement change linéairement avec le taux de cisaillement (Figure 2) et la viscosité apparente est presque indépendante du taux de cisaillement (Figure IV.1).



**Figure IV.2.** La courbe d'écoulement de 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate, expérimentale et par modèle Herschel Bulkley

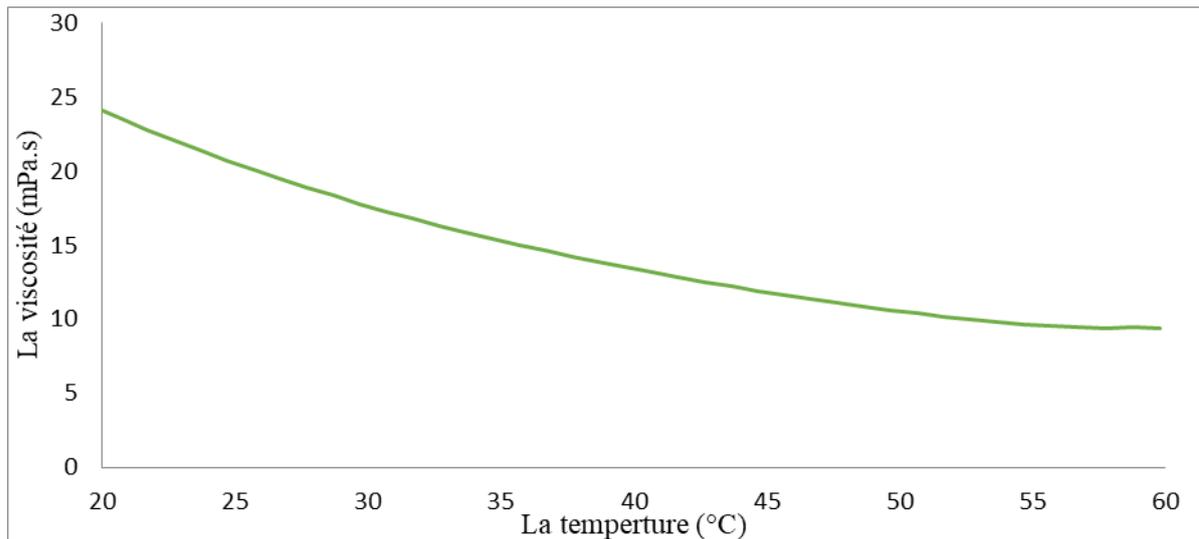
#### IV.2.2 Effet de la température

Il s'agit de tester la viscosité à différentes températures afin d'observer comment les caractéristiques rhéologiques changent avec les changements de température, comme le montre la figure IV.3. Sur cette figure, nous pouvons voir qu'avec l'augmentation de la température, la viscosité du 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate diminue continuellement. La raison en est qu'avec l'augmentation de la température, le mouvement thermique entre les molécules d'épaississant et de réticulant s'accélère, détruisant les liaisons chimiques entre les molécules et la relaxation de la structure, et finalement entraînant une moindre résistance à l'écoulement.

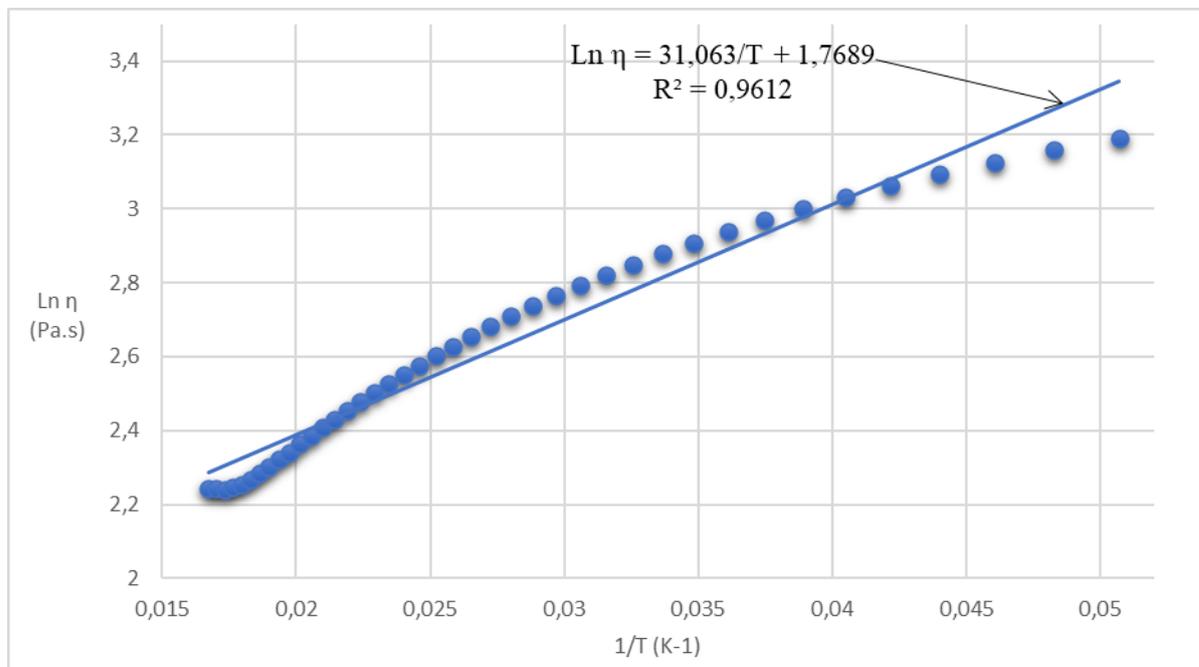
La dépendance de la viscosité à la température est bien décrite par l'équation de type Arrhenius

$$\eta = \eta_0 * \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{IV.2})$$

où  $\eta$  est la viscosité mesurée ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),  $\eta_0$  est constante,  $E_a$  est l'énergie d'activation ( $\text{kJ} / \text{mol}$ ) et  $R$  est la constante de gaz universelle ( $8,314 \text{ J} / \text{mol} / \text{K}$ ).



**Figure IV.3.** L'influence de la température sur la viscosité de 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate



**Figure IV.4.** Graphique de  $\ln(\eta)$  en fonction de  $T^{-1}$  pour 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate à différentes températures.

un graphique du logarithme de la viscosité  $\ln(\eta)$  par rapport à l'inverse de la température ( $T^{-1}$ ) est illustré à la figure 4. Les résultats montrent que la relation entre  $\ln \eta_0$  et  $T^{-1}$  est linéaire ( $R^2 = 0,9612$ ), ce qui correspond à la formule suivante :

$$\ln \eta = \ln \eta_0 + \frac{E_a}{RT} \quad (\text{IV.3})$$

D'après la figure 4, on peut voir que la pente en ligne droite est de 31,063; grâce au calcul, l'énergie

d'activation de l'écoulement visqueux du LI est de 257.717

Finalement, l'équation de type Arrhenius s'exprimée comme suit :

$$\eta = 5.8644 * \exp\left(\frac{31.063}{T}\right) \quad (4)$$

# Conclusion générale

---

## **Conclusion générale**

---

Dans la présente étude, la géométrie des cylindres coaxiaux a été utilisée pour la caractérisation de l'écoulement du 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate à différentes températures. 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate a montré un comportement d'amincissement par cisaillement dans une plage spécifique, a été bien décrit par le modèle de Herschel Bulkley.

L'effet de la température sur la viscosité apparente du 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate est analysé. Les résultats montrent que la viscosité apparente diminue avec l'augmentation de la température. Par analyse de régression, on peut constater que la viscosité à cisaillement nul dépend de la température et s'accorde avec l'équation d'Arrhenius.

Comme le montre l'essai de balayage de déformation, la région viscoélastique linéaire (LVR) du 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate peut atteindre une déformation de cisaillement d'environ 0.4%.

En conclusion, les mesures expérimentales rassemblées d'IL contribuent à une meilleure compréhension de la rhéologie de ce type de nouveaux composés et devraient aider au développement de nouveaux modèles précis.

# Bibliographie

---

# Bibliographie

---

- [1] C. Chen; A functionalised ionic liquid: 1-(3-chloro-2-hydroxypropyl)-3-methyl imidazolium chloride, *Phys. Chem. Liq.* 48 (3) (2010) 298e306.
- [2] I. Dinares, C.G. De Miguel, A. Ibanez, N. Mesquida, E. Alcalde, Imidazolium ionic liquids: A simple anion exchange protocol, *Green Chem.* 11 (10) (2009) 1507e1510.
- [3] E. Ennis, S.T. Handy, A facile route to C2-substituted imidazolium ionic liquids, *Molecules* 14 (6) (2009) 2235e2245.
- [4] H.-C. Kan, M.-C. Tseng, Y.-H. Chu, Bicyclic imidazolium-based ionic liquids: synthesis and characterization, *Tetrahedron* 63 (7) (2007) 1644e1653.
- [5] A.C. Kleinschmidt, *Produção de grafenopela abertura de nanotubos de carbono auxiliada por líquido iônico e uso em nanocompositos de resina epoxídica*, 2014.
- [6] A. Benabdellah, E.-H. Belarbi, H. Iikti, M. Hatti, B. Fettouhi, Electrical Properties of PANI/Chalcogenide Junctions Doped with Ionic Liquids Anions, *Tenside Surfactants Deterg.* 49 (3) (2012) 241e246.
- [7] B. Fetouhi, A. Benabdellah, E.H. Belarbi, H. Iikti, T. Benabdallah, Junction Characteristics System Based on Composite Organic Semiconductors: Polystyrene/Polyaniline Doped by [BMIM][BF<sub>4</sub>] Ionic Liquid, *Tenside Surfactants Deterg.* 51 (6) (2014) 541e546.
- [8] Ramanan Krishnamoorti et Emmanuel P. Giannelis ; Rheology of Silicate Nanocomposites, *Macromolecules*, 4097-4102 (1997).
- [9] Danillo Camargo et al; Investigation of the rheological properties of protic ionic liquids; *journal of physical organic chemistry* (2016).
- [10] Mohamed BOUZIT, « Caractérisation rhéologique et étude d'écoulement de fluides complexes, application au domaine de l'industrie agro-alimentaire », mémoire de Magister, Université des sciences et de la technologie d'ORAN.
- [11] Michel ROQUES, « Contrôle Industriel et Régulation Automatique, Mécanique des fluides », 2005.
- [12] André LALLEMAND, « Écoulement des fluides, Étude physique et cinématique », *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique*.
- [13] COUSSOT P., J-L GROSSIORD, « Comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton », article : Des concepts aux outils, J.-L. GROSSIORD' et D. QUEMADA.

- [14] Claude WOLFF, Dominique DUPUIS. « Viscosité », Techniques de l'ingénieur (R 2 350).  
Traité Génie énergétique
- [15] Élisabeth GUAZZELLI, « Rhéologie des fluides complexes », Octobre 2001
- [16] G.COURAZ- J.L.CROSSIOPD. « Initiation à la Rhéologie », Tech et doc, 1983.
- [17] Wier, T.P ; Hurley, F. US Pat. 4,446,349. 1948.
- [18] Wier, T.P. ; Hurley, F., 'The electrodeposition of aluminium from nonaqueous solutions at room temperature'. J. Electrochem. Soc. 1951, 98.
- [19] Wilkes, J. ; Zaworotko, M., 'Air and water stable 1-ethyl-3-methylimidazolium based ionic liquids'. Chem. Commun. 1992, 13, 965–967.
- [20] Egorova, K. S., Gordeev, E. G., & Ananikov, V. P. (2017) *Biological activity of ionic liquids and their application in and medicine* . Chemical Reviews, 117(10), 7132-7189.
- [21] M.G. Montalbán, C.L. Bolívar, F.G. DíazBaños, G. Vllora, Effect of Temperature, Anion, and Alkyl Chain Length on the Density and Refractive Index of 1-Alkyl-3-methylimidazolium-Based Ionic Liquids, J. Chem. Eng. Data. 60 (2015) 1986–1996.
- [22] F. Liu, X. Zhong, J. Xu, A. Kamali, Z. Shi, Temperature Dependence on Density, Viscosity, and Electrical Conductivity of Ionic Liquid 1-Ethyl-3-Methylimidazolium Fluoride, Appl. Sci. . 8 (2018).
- [23] F. Yan, W. He, Q. Jia, Q. Wang, S. Xia, P. Ma, Prediction of ionic liquid viscosity at variable temperatures and pressures, Chem. Eng. Sci. 184 (2018) 134–140.
- [24] M.S. Kelkar, E.J. Maginn, Effect of Temperature and Water Content on the Shear Viscosity of the Ionic Liquid 1-Ethyl-3-methylimidazolium Bis(trifluoromethanesulfonyl)imide As Studied by Atomistic Simulations, J. Phys. Chem. B. 111 (2007) 4867–4876.
- [25] A. Baghban, M.N. Kardani, S. Habibzadeh, Prediction of viscosity of ionic liquids using a hybrid LSSVM and group contribution method, J. Mol. Liq. 236 (2017) 452–464.
- [26] A.A. Elgharbawy, F.A. Riyadi, M.Z. Alam, M. Moniruzzaman, Ionic liquids as a potential solvent for lipase-catalysed reactions: A review, J. Mol. Liq. 251 (2018) 150–166.
- [27] Bonhote, P., A.P. Dias, N. Papageorgiou, et al., Hydrophobic, highly conductive ambient temperature molten salts. Inorganic Chemistry, 1996. 35(5): p. 1168-1178.
- [28] Carmichael, A.J. and K.R. Seddon, Polarity study of some 1-alkyl-3-methylimidazolium ambient temperature ionic liquids with the solvatochromic dye, Nile Red. Journal of Physical Organic
- [29] Aki, S.N.V.K., J.F. Brennecke, and A. Samanta, How polar are room-temperature ionic liquids Chemical Communications, 2001(5): p. 413-414.
- [30] Reichardt, C., Polarity of ionic liquids determined empirically by means of solvatochromic

pyridinium N-phenolatebetainedyes. *Green Chemistry*, 2005. 7(5): p. 339-351.

[31] Endres, F., Ionic liquids: Solvents for the electrodeposition of metals and semiconductors.

[32] Abbott, A.P. and K.J. McKenzie, Application of ionic liquids to the electrodeposition of metals. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2006. 8(37): p. 4265-4279.

[33] Sakaebe, H. and H. Matsumoto, N-Methyl-N-propylpiperidinium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (PP 13-TFSI) - novel electrolyte base for Li battery. *Electrochemistry Communications*, 2003. 5(7): p. 594-598.

[34] McEwen, A.B., H.L. Ngo, K. LeCompte, et al., Electrochemical properties of imidazolium salt electrolytes for electrochemical capacitor applications. *Journal of the Electrochemical Society*,

[35] O'Mahony, A.M., D.S. Silvester, L. Aldous, et al., Effect of Water on the Electrochemical Window and Potential Limits of Room-Temperature Ionic Liquids. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2008. 53(12): p. 2884-2891.

[36] Schroder, U., J.D. Wadhawan, R.G. Compton, et al., Water-induced accelerated ion diffusion: voltammetric studies in 1-methyl-3-[2,6-(S)-dimethylocten-2-yl]imidazolium tetrafluoroborate, butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate and hexafluorophosphate ionic liquids. *New Journal of Chemistry*, 2000. 24(12): p. 1009-1015.

[37] B. Wang, L. Qin, T. Mu, Z. Xue, G. Gao, Are Ionic Liquids Chemically Stable?, *Chem. Rev.* 117 (2017) 7113–7131.

[38] Wang, B., Qin, L., Mu, T., Xue, Z., & Gao, G. (2017). Are ionic liquids chemically stable. *Chemical reviews*, 117(10), 7113-7131

[39] A.R. Hajipour, F. Rafiee, Recent Progress in Ionic Liquids and their Applications in Organic Synthesis, *Org. Prep. Proced. Int.* 47 (2015) 249–308.

[40] R.L. Vekariya, A review of ionic liquids: Applications towards catalytic organic transformations, *J. Mol. Liq.* 227 (2017) 44–60.

[41] C. Dai, J. Zhang, C. Huang, Z. Lei, Ionic Liquids in Selective Oxidation: Catalysts and Solvents, *Chem. Rev.* 117 (2017) 6929–6983.

[42] A.R. Hajipour, F. Rafiee, Recent Progress in Ionic Liquids and their Applications in Organic Synthesis, *Org. Prep. Proced. Int.* 47 (2015) 249–308.

[43] Z.S. Qureshi, K.M. Deshmukh, B.M. Bhanage, Applications of ionic liquids in organic synthesis and catalysis, *Clean Technol. Environ. Policy.* 16 (2014) 1487–1513.

## ملخص :

السوائل الأيونية (IL) هي فئة من المذيبات الجديدة التي تم استخدامها بشكل متزايد في مجموعة متنوعة من التطبيقات في السنوات الأخيرة بسبب عدد مدهل من الخصائص المرغوب فيها، ومع ذلك لم يتم دراسة الخصائص الريولوجيا للسوائل الأيونية بالتفصيل ، وهناك حاليًا ارتباك فيما يتعلق باختيار النماذج الرياضية لهذا النوع من السوائل. لتعزيز الحالة الحالية للمعرفة، تم إجراء دراسة عملية للتحقق من لزوجة القص الثابت. تم تحديد خصائص تدفق السائل الأيوني (1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate) على نطاق من درجات الحرارة باستخدام هندسة الأسطوانة المحورية باستخدام مقياس ضغط Anton Paar MRC 302 -Bulkley أكثر دقة في وصف خصائص تدفق الأيونية سائل.

الكلمات المفتاحية : الريولوجيا ، السوائل الأيونية ، اللزوجة ، الريومترية

## Résumé :

Les liquides ioniques (IL) sont une classe de nouveaux solvants qui ont été de plus en plus utilisés dans une grande variété d'applications au cours des dernières années en raison d'un nombre étonnant de propriétés souhaitables. Cependant, les propriétés rhéologiques des liquides ioniques n'ont pas été étudiées en détail, et il existe actuellement une confusion quant au choix des modèles mathématiques pour ce type de fluide. Pour faire avancer l'état actuel des connaissances, une étude en laboratoire a été réalisée pour étudier la viscosité à cisaillement constant. Les caractéristiques d'écoulement de liquide ionique (1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate) ont été déterminées sur une plage de températures en utilisant la géométrie du cylindre coaxial à l'aide de Rhéomètre Anton Paar MRC 302. On constate que le modèle Herschel-Bulkley est plus précis pour décrire les propriétés d'écoulement de liquide ionique.

**Mots clés :** Rhéologie, liquides ioniques, viscosité, Rhéomètres

## Abstract :

Ionic liquids (ILs) are a class of new solvents that have been increasingly used in a wide variety of applications in recent years due to a surprising number of desirable properties. However, the rheological properties of ionic liquids have not been studied in detail, and confusion currently exists regarding the choice of mathematical models for this type of fluid. To advance the current state of knowledge, a laboratory study was conducted to investigate the constant shear viscosity. The flow characteristics of ionic fluid (1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate) were determined over a range of temperatures using the coaxial cylinder geometry using Anton Paar MRC 302 Rheometer. It is found that the Herschel-Bulkley model is more accurate in describing the ionic liquid flow properties.

**Keywords :** Rheology, ionic liquids, viscosity, Rheometers