

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*وزارة التعليم العالي و البحث العلمي*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة*  
*Université Djilali Bounaama Khemis Miliana*  
*Faculté des Sciences et de la Technologie*  
*Département de Technologie*



*Mémoire de fin d'études*  
*En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en*  
**Domaine : Sciences et Technologie**  
**Filière : Génie mécanique**  
**Spécialité : énergétique**

## *Thème du Mémoire*

**Etude expérimentale du comportement rhéologique du  
nano-lubrifiant Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/10W40**

*Présenté par :*

*M. KHLEDJ Riyadh*

*&*

*M. SELLAOUI Ahmed*

*Soutenu le : Juin 2018, Devant le jury :*

*Président : Dr AZZOUZI Djeloul*

*Promoteur : Dr MAZOUZI Ridha*

*Examineur : Mme HENNANE Amina*

*Année universitaire : 2017/2018*

## **Remerciements**

### **Avec l'aide d'Allah le tout puissant, nous avons pu accomplir ce travail**

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer d'une manière très particulière nos sincères remerciements à notre encadreur Dr. MAZOUZI Ridha, ce travail a été réalisé sous sa supervision et ses consignes, qui sans sa méthodologie, ses orientations et ses conseils précieux, n'aurait pas été accompli.

Comme nous tenons également à adresser nos remerciements en signe de gratitude et de reconnaissance :

Aux membres du jury qui ont pris la peine d'examiner et d'évaluer ce travail, de le corriger, et de nous honorer de leur présence.

A tous les enseignants depuis le cycle primaire jusqu'aux études supérieures car c'est grâce à eux que nous arrivons à ce stade, par leurs contributions dans notre réussite et par la transmission de leurs connaissances et leur savoir-faire.

A tous nos amis qui ont partagé le parcours avec nous et spécialement KHLEDJ Samir, BRADA Abdelkader et BOKRETA Brahim.

A tous les enseignants du département de Technologie de l'Université de Djilali Bounaama de Khemis-Miliana pour leurs efforts qui nous ont permis de finir notre parcours en vue de l'obtention du diplôme de Master.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

## Dédicaces

Aux personnes devant lesquelles tous les mots de l'univers sont incapables d'exprimer ma reconnaissance, aux êtres qui me sont les plus chers, qui ont payé des années d'amour et de sacrifices, ce prix de ma façon de penser. À mon père et ma mère. Si je ferais quoi que ce soit, je ne pourrais pas rendre vos bienfaits merci infiniment, je vous remercie d'avoir fait de moi un homme.

A mes sœurs Fatma Zahra et Djamila, à mes chers frères Farid et sa famille, Houssine et sa famille, Nassir, Bilal, Que dieu les protège.

A mon binôme Sellaoui Ahmed qui m'a partagé de beaux souvenirs durant nos études à Khemis Miliana. Là où j'ai eu vraiment le plaisir de m'inspirer de son intelligence je lui dis merci infiniment.

A mes chers amis, A tous ceux qui ont contribué de près et de loin à la réalisation de ce travail.

KHLEDJ RIYADH

## Dédicaces

A mes très chers parents qui ont toujours été à mes côtés, et qui sont pour moi un modèle de labeur et de persévérance, grâce à eux j'ai pu surmonter toutes les étapes de ma vie, les mots ne sauraient décrire toute ma gratitude envers eux. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour et merci d'avoir fait de moi un homme.

A ma sœur YASMINE et mon frère NADHIR qui m'ont soutenu durant tout mon cursus et qui m'ont encouragé et apporté toute leur affection durant cette année, je leurs souhaite une vie pleine de réussite.

A mes grands-mères je leurs souhaite une meilleure santé.

A toute la famille Sellaoui et Boziane rahmani.

A mes chers amis, Riyadh khledj, madani amine, Shuaibi Yousef, Ribouh Noureddine, guesmi Razqi, Akach lohamed djamel, zougar hamid, zaouli noureddine, nouri hakim, lazrag

SELLAOUI AHMED

# *Liste des figures*

## ***Chapitre I – Généralités sur les nano-fluides***

***Page***

- |            |   |   |
|------------|---|---|
| Figure I.1 | (a) Nanoparticules sphériques, (b) Nanotubes de carbone | 4 |
| Figure I.2 | Processus de préparation d'un nanofluide en deux étapes | 5 |
| Figure I.3 | Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape    | 5 |

## ***Chapitre II – Notion de base de la rhéologie***

- |              |  |    |
|--------------|--|----|
| Figure II.1  | Schéma de l'écoulement de cisaillement   | 13 |
| Figure II.2  | Forces agissant sur deux éléments de couches voisines                                      | 13 |
| Figure II.3  | Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles                            | 14 |
| Figure II.4  | Viscosité d'un liquide newtonien   | 17 |
| Figure II.5  | Allure des courbes d'écoulement des principaux types de fluides non newtoniens             | 17 |
| Figure II.6  | Diagramme logarithmique contrainte de cisaillement - taux de cisaillement                  | 19 |
| Figure II.7  | Courbe d'écoulement d'un fluide à seuil  | 20 |
| Figure II.8  | Courbe viscosité-temps d'un matériau thixotrope  | 21 |
| Figure II.9  | Courbe viscosité-temps d'un matériau rhéopectique  | 21 |
| Figure II.10 | Différentes géométries de rhéomètres rotatifs : (a) Couette<br>(b) Cône-Plan (c) Plan-Plan | 23 |

## ***Chapitre III – Etude expérimentale***

- |              |   |    |
|--------------|---|----|
| Figure III.1 | Photographie des nanoparticules de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 26 |
| Figure III.2 | Photographie de l'emballage commercial de l'huile SAE10W40              | 27 |
| Figure III.3 | Balance de précision  | 28 |
| Figure III.4 | Agitateur magnétique  | 28 |
| Figure III.5 | Photographie d'échantillons de nano-lubrifiants et d'huile moteur 10W40 | 29 |
| Figure III.6 | Rhéomètre Anton Paar MCR 302  | 30 |
| Figure III.7 | Géométrie de mesure à double entrefer                                   | 30 |

## ***Chapitre IV – Résultats et discussion***

- |             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure IV.1 | Variations de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement à différentes températures pour l'huile moteur 10W40 | 32 |
| Figure IV.2 | Diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour l'huile 10W40   | 32 |
| Figure IV.3 | Variations de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de                       | 33 |

		0.5%	
Figure	IV.4	Variations de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 1%	34
Figure	IV.5	Variations de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 2%	34
Figure	IV.6	Diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes températures pour l'échantillon avec 0.5% de fraction volumique solide	35
Figure	IV.7	Diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes températures pour l'échantillon avec 1% de fraction volumique solide	35
Figure	IV.8	Diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes températures pour l'échantillon avec 2% de fraction volumique solide	36
Figure	IV.9	Diagramme de la viscosité apparente en fonction de la fraction volumique pour température de 40°C	37
Figure	IV.10	Diagramme de l'indice d'écoulement n et l'indice de consistance k en fonction de la fraction volumique	38
Figure	IV.11	Diagramme de l'indice d'écoulement et indice de consistance en fonction de la température	39

# *Liste des tableaux*

## ***Chapitre I – Généralités sur les nano-fluides***

***Page***

Tableau I.1      Combinaisons nanoparticules/fluides de base

6

## ***Chapitre II – Notion de base de la rhéologie***

Tableau II.1      Valeurs de viscosité de fluides

16

## ***Chapitre III – Etude expérimentale***

Tableau III.1      Caractéristiques des nanoparticules d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

25

Tableau III.2      Caractéristiques de l'huile SAE10W40

26

Tableau III.3      Masse de nanoparticule  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

28

## ***Chapitre IV – Résultats et discussion***

Tableau IV.1      Indices de la loi de puissance et de consistance de l'huile de base

33

Tableau IV.2      Indices de la loi de puissance du nano-lubrifiant  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  / 10W40

36

Tableau IV.3      Indices de consistance du nano-lubrifiant  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  / 10W40

37

# *Nomenclature*

## Notations associées à l'alphabet romain

<i><b>Symbole</b></i>	<i><b>Désignation</b></i>	<i><b>Unité</b></i>
<b>C<sub>p</sub></b>	Chaleur spécifique	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
<b>E</b>	Module d'élasticité	[MPa]
<b>K</b>	Indice de consistance	[Pa.S <sup>n</sup> ]
<b>K<sub>bf</sub></b>	Conductivité thermique du fluide de base	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
<b>K<sub>nf</sub></b>	Conductivité thermique du nanofluide	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
<b>K<sub>p</sub></b>	Conductivité thermique des particules	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
<b>m<sub>f</sub></b>	Masse de fluide	[Kg]
<b>m<sub>p</sub></b>	Masse particule	[Kg]
<b>n</b>	Facteur de forme empirique	-
<b>T</b>	Température	[C°]
<b>V<sub>s</sub></b>	volume de solide (nanoparticules)	[m <sup>3</sup> ]
<b>V<sub>f</sub></b>	volume du fluide de base	[m <sup>3</sup> ]

## Notations associées à l'alphabet grec

<i><b>Symbole</b></i>	<i><b>Désignation</b></i>	<i><b>Unité</b></i>
$\gamma$	La déformation	-
$\lambda$	Conductivité thermique	[W/m.K]
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide	[Pa.s]
$\mu_n$	Viscosité du milieu	[Pa.s]
$\mu_{nf}$	Viscosité de la suspension	[Pa.s]
$\mu_{pl}$	Viscosité plastique	[Pa.s]
$\nu$	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho_f$	La masse volumique du fluide	[g.cm <sup>-3</sup> ]
$\rho_{nf}$	La masse volumique du nanofluide	[g.cm <sup>-3</sup> ]
$\rho_h$	Masse volumique de l'huile	[g.cm <sup>-3</sup> ]
$\rho_p$	Masse volumique de la nanoparticule	[g.cm <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$	La masse volumique du solide	[g.cm <sup>-3</sup> ]
$\tau$	Contrainte de cisaillement	[Pa]
$\emptyset$	Fraction volumique	-
$\varphi$	Concentration en volume des particules	-
$\varphi_m$	Compacité maximale d'empilement granulaire	-
$\psi$	La sphéricité des particules	-

## Indices et exposants

<i><b>Symbole</b></i>	<i><b>Désignation</b></i>	
pH	Le potentiel hydrogène	
NTC	Les nanotubes de titan	
K	Indice de consistance	[Pa.S <sup>n</sup> ]
n	Indice d'écoulement	-



## الملخص :

في هذه الدراسة، يتم دراسة السلوك الانسيابي لزيت التشحيم النانوية Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/10W40 من خلال نهج تجريبي. أولاً، تم تشتيت الجسيمات النانوية Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> في زيت المحرك 10W40 مع التركيز الحجمي للجزيئات النانوية في السائل تقدر ب 0.5%، 1% و 2%. تم قياس لزوجة زيت التشحيم النانوية المحضرة في درجات حرارة تتراوح من 20 درجة مئوية إلى 60 درجة مئوية بمعدلات قص تتراوح بين 100 s<sup>-1</sup> إلى 2000 s<sup>-1</sup>. من تحليل النتائج، تم الكشف على أن الزيوت الأساسية وزيت التشحيم النانوية هي سوائل غير نيوتونية تظهر سلوك سيولة أكثر عند زيادة جهد القص. وقد تبين أنه عند درجات الحرارة المرتفعة، فإن تأثير درجة الحرارة أكثر من تأثير إضافة الجسيمات النانوية.

**الكلمات المفتاحية:** نانو زيوت التشحيم ، السلوك الريولوجي ، سيولة بالقص

## RESUME

Dans la présente étude, le comportement rhéologique du nano-lubrifiant Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / 10W40 est étudié par une approche expérimentale. Premièrement, les nanoparticules de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> étaient dispersées dans de l'huile moteur 10W40 avec des fractions volumiques solides de 0,5%, 1% et 2%. La viscosité du nano-lubrifiant préparé a été mesurée dans des plages de température de 20°C à 60°C à des taux de cisaillement variant de 100 s<sup>-1</sup> à 2000 s<sup>-1</sup>. De l'analyse des résultats, il a été révélé que l'huile de base et les nano-lubrifiants sont des fluides non newtoniens qui présentent un comportement rhéofluidifiant. Il a été montré qu'à haute température, l'effet de la température est plus dominant que l'effet de l'ajout des nanoparticules.

**Mots clés :** Nano-lubrifiant, Comportement rhéologique, Rhéofluidifiant

## Abstract:

In this present study, the rheological behavior of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ 10W40 nano-lubricant is investigated by an experimental approach. Firstly, the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles were dispersed in 10W40 engine oil with solid volume fractions of 0.5%, 1% and 2%. The viscosity of the composed nano-lubricant was measured in temperature ranges from 20 °C to 60 °C at shear rates ranging from 100 s<sup>-1</sup> to 2000 s<sup>-1</sup>. From analyzing the results, it was revealed that both of the base oil and nano-lubricants are non-Newtonian fluids which exhibit shear thinning behavior. It has been shown that at high temperature, the effect of temperature is more dominant than the effect of adding nanoparticles.

**Keywords:** Nano-lubricant, Rheological Behavior, Shear thinning

# Sommaire

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I : Généralités sur les nano-fluides

I.1	Definition .....	3
I.2	Types de nano-fluides .....	3
I.3	Preparation de nano-fluides .....	4
I.4	Application de nano-fluides .....	6
I.5	Propriétés thermo physiques de nano-fluides .....	7
	I.5.1 Fraction volumique( $\phi$ ) .....	7
	I.5.2 Viscosité dynamique( $\mu$ ) .....	8
	I.5.3 Masse volumique ( $\rho$ ) .....	8
	I.5.4 Conductivité thermique (K) .....	9
	I.5.5 Chaleur spécifique ( $c_p$ ).....	10
I.6	Les avantages des nano-fluides .....	11
I.7	Les inconvénients des nanofluides.....	11

## Chapitre II : Notion de bases de la rhéologie

II.1	Introduction .....	12
II.2	Grandeurs rhéologiques .....	12
	II.2.1 Contrainte de cisaillement.....	13
	II.2.2 Taux de cisaillement : .....	14
	II.2.3 Viscosité.....	15
II.3	Modèles rhéologiques.....	16
	II.3.1 Fluides newtoniens .....	16
	II.3.2 Fluides non newtoniens au comportement indépendant du temp.....	17
	II.3.2.1 Fluides rhéofluidifiants.....	18
	II.3.2.2 Fluides rhéoépaississa.....	18
	II.3.2.3 Fluides à seuil .....	20
	II.3.3 Fluides non newtoniens au comportement dépendant du temps.....	21
	II.3.3.1 La thixotropie .....	21
	II.3.3.2 L'Antithixotropie.....	21
	II.3.4 Fluides viscoélastiques.....	22

<b>II.4</b>	<b>Les rhéomètres .....</b>	<b>22</b>
<b>II.4.1</b>	<b>Présentation .....</b>	<b>22</b>
<b>II.4.2</b>	<b>Les rhéomètres rotatifs .....</b>	<b>22</b>
<b>II.5</b>	<b>Lois rhéologiques des suspensions .....</b>	<b>23</b>
<b>II.5.1</b>	<b>Présentation .....</b>	<b>23</b>
<b>II.5.2</b>	<b>Loi d'EISTEIN.....</b>	<b>23</b>
<b>II.5.3</b>	<b>Loi des suspensions concentrées.....</b>	<b>24</b>

### **Chapitre III : Etude expérimentale**

<b>III.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>25</b>
<b>III.2</b>	<b>Présentation des nano-particules d'oxyde de fer Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.....</b>	<b>25</b>
<b>III.3</b>	<b>Présentation du fluide de base de l'huile SAE 10W40. ....</b>	<b>26</b>
<b>III.4</b>	<b>Préparation des échantillons .....</b>	<b>27</b>
<b>III.5</b>	<b>Déroulement des essais .....</b>	<b>29</b>

### **Chapitre IV : Résultats et discussion**

<b>IV.1</b>	<b>Introduction : .....</b>	<b>31</b>
<b>IV.2</b>	<b>Comportement rhéologique de fluide de base.....</b>	<b>31</b>
<b>IV.3</b>	<b>Comportement rhéologique du nano-lubrifiant.....</b>	<b>33</b>
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>40</b>
<b>Bibliographie.....</b>		<b>41</b>

---

# Introduction générale

---

## *Introduction générale*

Les nanoparticules représentent aujourd'hui un enjeu technologique et économique majeur. Elles permettent des innovations très prometteuses dans de nombreux domaines fondamentaux tels que : la santé, l'énergétique ou l'industrie.

Les huiles lubrifiantes sont des liquides visqueux utilisées pour la lubrification des parties mobiles des moteurs et des machines. Ce sont des produits pétroliers qui se dégradent après un certain temps d'utilisation, par contamination avec des éléments polluants.

La Sélection d'un lubrifiant est très importante pour garantir une vie plus longue des mécanismes et des machines. Pour faire une sélection appropriée d'un lubrifiant, il est nécessaire de connaître ses propriétés. Parmi ces propriétés : la viscosité, l'indice de viscosité, la densité, la compressibilité, le point de trouble, le point d'écoulement, le point d'éclair, le coefficient de frottement, etc... La propriété la plus importante est la viscosité. La viscosité est une fonction du taux de cisaillement et de la température. La relation entre la viscosité et le taux de cisaillement d'une part, et entre la viscosité et la température d'autre part est également importante pour la rhéologie du lubrifiant ainsi que pour la durée de vie des éléments de machine.

Pour améliorer les performances d'une huile lubrifiante, les chercheurs ont recours actuellement aux nanoparticules. L'ajout de ces nanoparticules à une huile de base permet d'obtenir un nano-lubrifiant avec des caractéristiques rhéologiques modifiées.

Le travail réalisé dans le cadre de ce projet de fin d'étude a comme objectif d'étudier expérimentalement les caractéristiques rhéologiques du nano-lubrifiant  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SAE10W40}$ . L'effet du taux de cisaillement, de la fraction volumique solide et de la température sur la viscosité du nano-lubrifiant est examiné à partir des essais expérimentaux réalisés sur rhéomètre.

Ce mémoire comporte deux grandes parties : une partie bibliographique et une partie expérimentale.

I : La partie bibliographique comporte deux chapitres :

- Dans le premier chapitre, on présentera des généralités sur les nano-fluides : types des nano-fluides, ses applications ainsi que les principales propriétés thermo-physiques des nano-fluides.
- Le deuxième chapitre sera consacré aux notions de base de la rhéologie : les grandeurs et les modèles rhéologiques des fluides sont définis, on présentera ainsi les instruments de mesure rhéologique telle que les rhéomètres rotatifs.

II : Partie expérimentale : elle est répartie en deux chapitres.

- Le troisième chapitre mettra l'accent sur la caractérisation des matériaux et matériel utilisés durant la réalisation des essais. Une description détaillée sur la préparation des échantillons et sur le déroulement des manipulations est aussi présentée.
- Dans le quatrième chapitre, nous exposons et nous évaluons les résultats obtenus lors des séries de mesure.

Enfin, dans une conclusion générale, sont rappelés les principaux résultats obtenus.

---

# Chapitre 1

## Généralités sur les nano-fluides

---

### ***1.1 Définition***

Les nanofluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'améliorer certaines propriétés.

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont :

- Les nanoparticules des oxydes métalliques :
  - L'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).
  - L'oxyde de cuivre ( $\text{CuO}$ ).
  - L'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ).
  - L'oxyde de Titane ( $\text{TiO}_2$ ).
- Les nanoparticules métalliques:
  - L'aluminium (Al).
  - Le cuivre (Cu).
  - L'or (Au).
  - L'argent (Ag).
- Les nanoparticules non métalliques:
  - Les nanotubes de carbone (CNT).
  - Le diamant (C).

Un nanofluide est une solution colloïdale contenant des particules solides de petite taille, désignée sous le terme de « nanoparticules », en suspension dans un liquide de base dont on veut modifier ou améliorer certaines propriétés, notamment thermiques et rhéologiques.

Le choix des liquides de bases est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégation, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule, les solvants les plus utilisés sont :

- ✓ L'eau
- ✓ L'éthylène glycol, EG
- ✓ Les huiles
- ✓ Le toluène



## *1.2 Types des nano-fluides*

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) constitue un champ de recherche en pleine expansion. D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories (figure I.1) :

- Les nanoparticules sphériques pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent ainsi être à base de métaux (cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou d'oxydes de cuivre (oxyde d'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane  $\text{TiO}_2$ ...).
- Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane  $\text{TiO}_2$ , nanotube de silicium...)

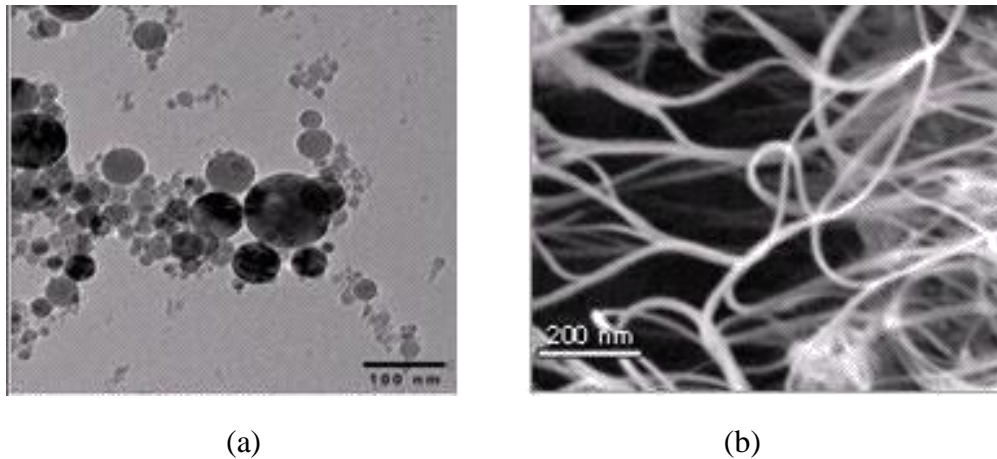


Figure I. 1: (a) Nanoparticules sphériques, (b) Nanotubes de carbone [1]

## *1.3 Préparation des nanofluides*

Les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories :

- les procédés physiques, comme le broyage mécanique,
- les procédés chimiques, comme la pyrolyse laser ou la précipitation chimique .

Il existe deux méthodes principales pour produire des nanofluides :

- **La méthode en deux étapes** consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action mécanique à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrasons est souvent nécessaire afin de briser les agglomérats (figure I.2). En outre, pour éviter

l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, on utilise des forces de répulsion électrostatique en chargeant la surface des particules en adaptant le pH. On peut également utiliser les forces de répulsion stériques à l'aide de molécules adsorbées ou greffées sur la surface.

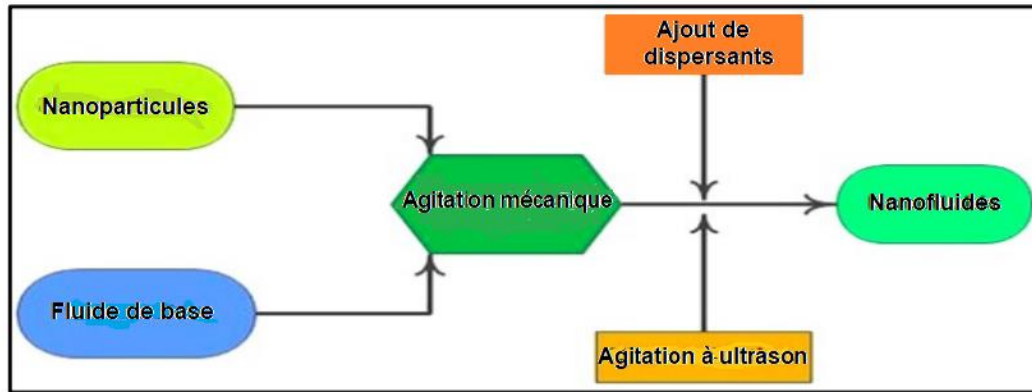


Figure I.2 : Processus de préparation d'un nanofluide en deux étapes

- **La méthode en une seule étape** consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base. Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nanofluides mais permet d'éviter l'agglomération et l'oxydation des nanoparticules. Un exemple de procédé consiste à condenser sous forme de nanoparticules une vapeur métallique dans un réacteur sur un film de liquide à basse tension de vapeur (figure I.3). [2]

Le tableau I.1 regroupe une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base préparés par différents groupes de recherche. [2]

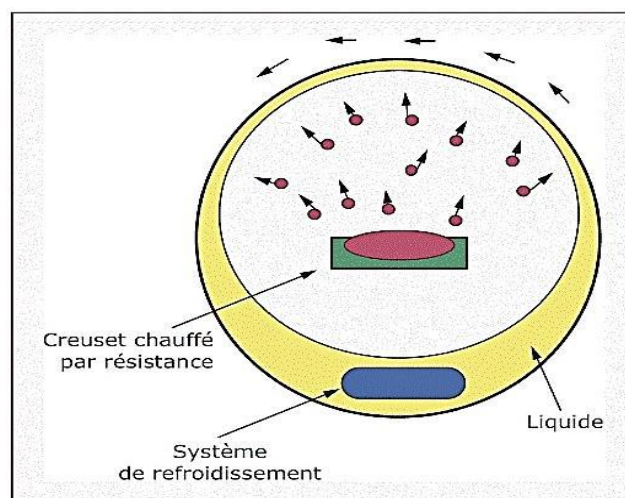


Figure I. 3 : Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape

Tableau I.1 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base [2]

	Acétone	Eau	Éthylène glycol	Huile	Toluène	Décène
Ag		x		x		
Au		x			x	
Al <sub>70</sub> Cu <sub>30</sub>			x			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		x	x	x		
Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>						
C(diamant)		x				
C(graphite)		x		x		
C (NTC)		x		x		x
C (fullerène)				x	x	
Cu	x	x	x	x		
CuO		x	x			
Fe			x			
SiC		x				
SiO <sub>2</sub>		x	x			
TiO <sub>2</sub>		x	x			
WO <sub>3</sub>			x			
ZrO <sub>2</sub>		x				

#### ***1.4 Les applications des nanofluides***

les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'application pour leurs propriétés magnétiques (paliers magnétique à ferrofluides, agents de contraste en imagerie médicale), pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électrolomoiillage pour lentilles liquides), et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules fonctionnalisées.

En thermique, les nanofluides peuvent être utilisés partout où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées : refroidissement de composant électrique et électronique, radars, automobile...etc).

Les nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance, ainsi que des micro Electro Mechanical Systems . [3]

### ***Autres applications***

- ✓ L'échangeur de chaleur.
- ✓ Le refroidissement d'éléments électroniques (produire un nanofluide stable qui est compatible avec des circuits et des composants électroniques).
- ✓ Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs (formulations de lubrifiants et liquides de refroidissement mélangés avec des nanoparticules pourraient entraîner une augmentation de l'efficacité énergétique des réfrigérateurs)
- ✓ Aéronautique et spatial.
- ✓ Refroidissement des systèmes nucléaire.
- ✓ Transport (gestion de refroidissement / véhicule moteur thermique).
- ✓ Autres applications (caloducs, piles à combustible, le chauffage solaire d'eau, forage, stockage thermique).

### ***1.5 Propriétés thermo-physiques des nanofluides***

Les propriétés thermo physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des paramètres thermo physiques des nano-fluides obtenus (la nature des nanoparticules, leur taille, la fraction volumique  $\phi$ , la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu ....etc.).

#### ***1.5.1 La fraction volumique ( $\phi$ )***

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nanofluide, puisque les calculs de toutes les autres propriétés sont basés sur la fraction volumique du nanofluide. On peut définir la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base). La valeur de la fraction volumique varie entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante :

$$\phi = \frac{\text{Volume de solide}}{\text{Volume total du nanofluide}} = \frac{V_S}{V_S + V_f} \quad (\text{I.1})$$

Avec:

$V_s$  : volume de solide (nanoparticules) [ $m^3$ ]

$V_f$  : volume du fluide de base [ $m^3$ ]

### ***1.5.2 Viscosité dynamique( $\mu$ )***

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. Sa connaissance est fondamentale pour toutes les applications impliquant le transport de fluides. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nanofluide mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. Ainsi, ces deux propriétés sont étroitement corrélées, et doivent être maîtrisées en vue d'une exploitation de ce type de fluids dans différentes applications.

Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions :

#### ***A - Modèle d'Einstein (1906)***

La viscosité dynamique d'un nanofluide est donnée par la relation d'Einstein pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines rigides, la relation d'Einstein et la suivante : [4]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\emptyset \quad (I.2)$$

Avec :

$\mu_{nf}$  : La viscosité dynamique du nanofluide

$\mu_{bf}$  : La viscosité dynamique du fluide de base

$\emptyset$  : La fraction volumique des nanoparticules

Cette relation est valable juste pour  $\emptyset < 0,03$ .

#### ***B - Modèle de Brinkman (1952)***

Par contre, Brinkman a généralisé la formule d'einstein pour qu'elle puisse être utilisée dans une large plage de concentrations volumiques. [5]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\phi)^{\frac{5}{2}}} \quad (I.3)$$

### 1.5.3 Masse volumique ( $\rho$ )

La détermination de la masse volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique  $\phi$  à une température T donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange.

Dans le cas d'un mélange la masse volumique est donnée par la relation suivante :

$$\rho = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f+m_s}{V_f+V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f+V_s} \quad (I.4)$$

La fraction volumique des nanoparticules,  $\phi$  désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide+solide) :

$$\phi = \frac{\text{volume du solide}}{\text{volume total du nanofluide}} = \frac{V_s}{V_s+V_f}$$

En déduire alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (I.5)$$

Où :

$\rho_{nf}$  : la masse volumique du nanofluide

$\rho_f$  : la masse volumique du fluide

$\rho_s$  : la masse volumique du solide

### 1.5.4 Conductivité thermique (K)

La conductivité thermique ou conductibilité thermique notée  $\lambda$  ou K en (W/m.K), est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Elle représente l'énergie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 kelvin ou 1 degré Celsius par mètre.

Il existe plusieurs modèles théoriques permettant d'estimer sous certaines conditions, la conductivité thermique des suspensions.

Nous présentons dans cette partie les modèles les plus utilisés dans le cas des nanofluides.

**A - Modèle de Maxwell (1873)**

Maxwell fait le premier à dériver un modèle pour estimer la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules.

Le modèle de Maxwell est donné par la formule suivante : [6]

$$K_{nf} = \frac{K_p + 2K_{bf} - 2\emptyset(K_{bf} - K_p)}{K_p + 2K_{bf} + \emptyset(K_{bf} - K_p)} K_{bf} \quad (I.6)$$

Où :

$K_{nf}$  : La conductivité thermique du nanofluide [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]

$K_{bf}$  : La conductivité thermique du fluide de base [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]

$K_p$  : La conductivité thermique des particules [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]

$\emptyset$  : La fraction volumique des nanoparticules

Le modèle de Maxwell est satisfaisant pour les suspensions contenant des particules sphériques de concentrations volumiques relativement faibles mais ne tient pas compte de l'effet de la taille ni de la forme des particules. Il est à noter aussi que l'effet des interactions inter-particules est négligé dans ce modèle.

**B - Modèle de Hamilton et Crosser (1962)**

Le modèle de Hamilton et Crosser a été établi pour résoudre la limite du modèle de Maxwell. Puisque ce dernier n'est valable que dans le cas des particules sphériques, Pour cela le modèle de Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la conductivité thermique du nanofluide quel que soit la forme de la nanoparticule, en introduisant la notion du facteur géométrique appelé la sphéricité ( $\psi$ ). Ce facteur est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule.

Dans ce modèle, la conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante [7] :

$$K_{nf} = \frac{K_p + (n-1)K_{bf} - (n-1)(K_{bf} - K_p)\emptyset}{K_p + (n-1)K_{bf} + (K_{bf} - K_p)\emptyset} K_{bf} \quad (I.7)$$

n est un facteur de forme empirique donné par :  $n = \frac{3}{\psi}$

$n = 3$  pour les particules sphériques et  $n = 6$  pour les particules cylindriques. Pour ( $\psi = 1$ ) (particules sphériques) le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell.

### ***1.5.5 Chaleur spécifique ( $C_p$ )***

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène  $c_p = \frac{dQ}{m dt}$ . La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on peut citer les deux modèles suivantes :

#### ***A- Modèle du Pak et Cho***

Pak et Cho ont utilisé la formule suivante : [8]

$$(C_p)_{nf} = (1 - \phi)(C_p)_{bf} + \phi(C_p)_p \quad (I.8)$$

#### ***B- Modele de Xuan et Roetzel***

Xuan et Roetzel ont travaillé avec la formule ci-dessous : [9]

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_p \quad (I.9)$$

$(C_p)$ ,  $(C_p)_{bf}$ ,  $(C_p)_p$  désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nanofluide, du fluide de base et des nanoparticules.

## ***1.6 Les avantages des nano-fluides***

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.



### ***1.7 Les inconvénients des nano-fluides***

- Fortes pertes de charge.
- Erosion.
- Sédimentation.
- Viscosité supérieur, chaleur spécifique basse.
- Bouchons dans les écoulements.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production.

---

# Chapitre 2

## Notion de base de la rhéologie

---

### ***II.1-Introduction***

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps.

Les procédés de préparation des produits (solutions, pâtes, etc...) ou de la mise en forme des pièces (en métallurgie, en plasturgie, etc...) ou de circulation des fluides (pétrole, huile, etc. ..) nécessitent immanquablement l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de cette matière pour déterminer les forces à mettre en jeu.

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

- Rhéologie expérimentale : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation).
- Rhéologie structurale : explication des comportements à partir de la structure du matériau.
- Rhéologie théorique : fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique.

### ***II.2-Grandeurs rhéologiques***

Pour définir les principales grandeurs rhéologiques, considérant l'écoulement laminaire d'un fluide entre deux plateaux parallèles, dont l'un se déplace à une vitesse constante et l'autre est stationnaire (Fig. II.1).

Les trois grandeurs fondamentales qui permettent de décrire les déformations du fluide sont :

- La contrainte de cisaillement notée en général  $\tau$  exprimée en  $\text{N/m}^2$
- Le taux de cisaillement (ou gradient de vitesse) noté en général  $\dot{\gamma} = v/h$ , exprimé en  $\text{s}^{-1}$
- La viscosité dynamique de cisaillement  $\mu$  exprimée en  $\text{Pa.s}$ .

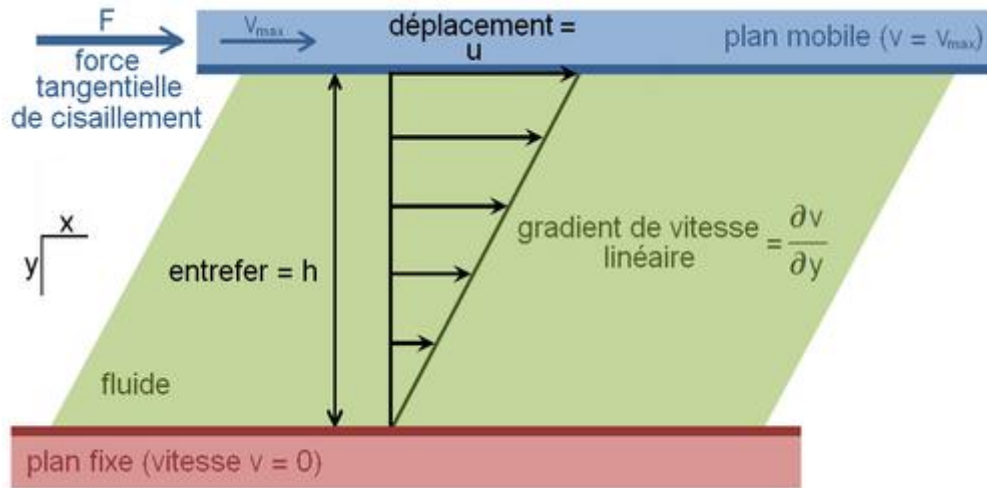


Figure II.1 : Schéma de l'écoulement de cisaillement

### II.2.1- Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement (notée  $\tau$ ) 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 (figure II.2).

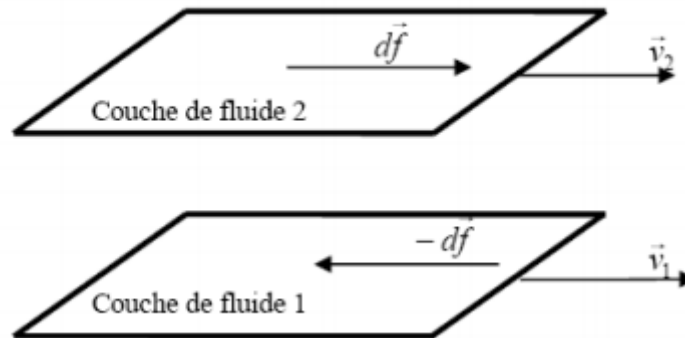


Figure II.2 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.

En supposant que la couche (1) est animée d'une vitesse  $v_1$  supérieure à la vitesse  $v_2$  de la couche (2), la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement  $dF$  parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). La couche (2) exerce pour sa part sur la

couche (1), une force de cisaillement –  $dF$  tendant à la freiner. En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface, on définit la contrainte de cisaillement  $\tau$  (équation II.1) :

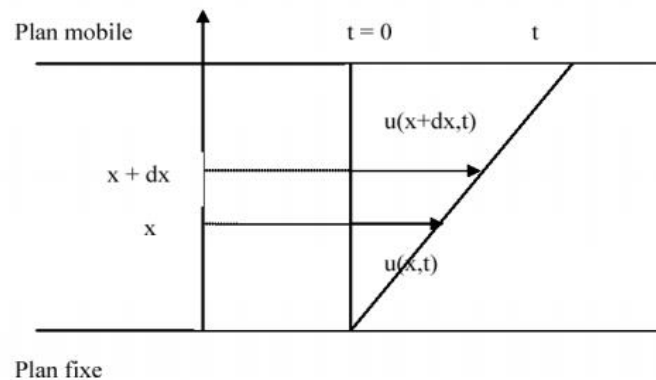
$$\tau = \frac{dF}{ds} \quad (\text{II.1})$$

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

Il est à noter que dans le calcul de la résultante des forces, les forces de pression s'exerçant perpendiculairement à la surface ne sont pas prises en compte, du fait de leur faible valeur en comparaison des forces de cisaillement.

### II.2.2- Taux de cisaillement

La déformation et la vitesse de cisaillement sont les grandeurs cinématiques fondamentales en rhéologie. La définition de la déformation de cisaillement 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 (Figure II.3).



**Figure II.3** : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.

On considère arbitrairement que les particules de matière de deux couches adjacentes se trouvent à l'instant  $t = 0$  dans une section droite. A l'instant  $t$  postérieur, les particules auront parcouru la distance  $u(x, t)$  pour la particule située à l'abscisse  $x$  et  $u(x+dx,t)$  pour la particule située à l'abscisse  $x+dx$ . La déformation de cisaillement est définie par l'équation II.2:

$$\gamma = \frac{du(x,t)}{dx} \quad (\text{II.2})$$

Cette grandeur est sans dimension ; elle ne dépend pas du déplacement  $u(x,t)$  lui-même mais de la variation de ce déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une couche infiniment proche.

L'expression de la vitesse de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) est donnée par l'équation II.3, il s'agit de la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (\text{II.3})$$

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

### II.2.3- Viscosité

L'idée de viscosité pour un fluide réel (fluide visqueux) est apparue en 1687 d'Isaac Newton, suite aux expériences de Robert Hooke en 1678 sur un solide élastique. En observant la résistance à l'écoulement d'un fluide, Newton suggère en fait que la viscosité, c'est-à-dire la réaction à la contrainte appliquée, est proportionnelle au gradient de vitesse.

L'équation correspondante s'écrit :

$$\frac{F}{S} = \mu \frac{dU}{dx}$$

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{II.4})$$

Où  $\tau$  est la contrainte appliquée (mesurée en Pa),  $\dot{\gamma}$  est le gradient de vitesse (en  $s^{-1}$ ) et  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide (donnée en Pa.s).

On définit également la viscosité cinématique  $\nu$  qui est le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique du fluide.

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

L'unité de la viscosité cinématique est exprimée en  $m^2/s$  dans le système SI, dans le système cgs, on utilise le Stoke (St) où  $1 m^2/s = 10^6 \text{ cSt}$ .

Dans le tableau (II.1), on trouve à titre d'exemple une comparaison entre les valeurs des viscosités dynamiques et cinématiques de quelques fluides.

**Tableau II.1 :** Valeurs de viscosité de fluides (à 20°C et à pression atmosphérique normale) [7]

	Viscosité dynamique $\mu$ (Pa.s)	Viscosité cinématique $m^2 /s$ ( $\times 10^{-6}$ )
<b>Eau (20°C)</b>	$10^{-3}$	1.006
<b>Air (20°C)</b>	$18.2 \cdot 10^{-6}$	15.1
<b>Glycérine (20°C)</b>	1.49	1180
<b>Benzène (20°)</b>	$0.625 \cdot 10^{-3}$	0.741
<b>Mercure (20°C)</b>	$1.55 \cdot 10^{-3}$	0.116
<b>CO<sub>2</sub> (20°C, 1 atm.)</b>	$14.7 \cdot 10^{-6}$	8.03
<b>H<sub>2</sub> (20°C, 1 atm.)</b>	$8.83 \cdot 10^{-6}$	105

### ***II.3-Modèles rhéologiques***

La rhéologie des fluides a pour objectif la caractérisation des produits par l'expression de relations contraintes-déformations liées à leurs propriétés mécaniques. Si la viscosité est indépendante du gradient de vitesse, le fluide est dit newtonien. Dans le cas contraire, le fluide est non-newtonien. Il existe plusieurs familles de fluides non newtoniens que l'on peut différencier par la forme de la courbe donnant en fonction de  $\dot{\gamma}$ , que l'on appelle un rhéogramme, et que l'on obtient généralement expérimentalement à l'aide d'un rhéomètre.

#### ***II.3.1- Fluides newtoniens*** [10]

La majorité des fluides rencontrés dans la nature sont newtoniens. L'eau, l'air et les huiles de faible viscosité en sont les exemples les plus représentatifs. Le comportement d'un fluide newtonien est caractérisé par une dépendance linéaire entre les contraintes et les vitesses de déformations. Le coefficient de proportionnalité étant la viscosité dynamique. Celle-ci est par ailleurs indépendante du taux de cisaillement et constante en fonction du temps (Figure II.4).

Ils sont caractérisés par l'équation rhéologique d'état :

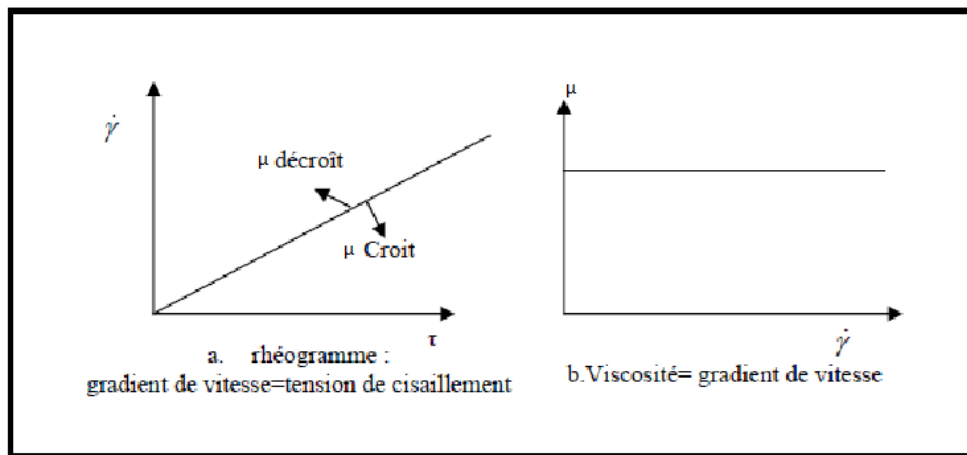
$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (II.5)$$

$\tau$  : Contrainte de cisaillement [Pa].

$\dot{\gamma}$  : Vitesse de cisaillement [ $s^{-1}$ ].

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide [Pa.s].

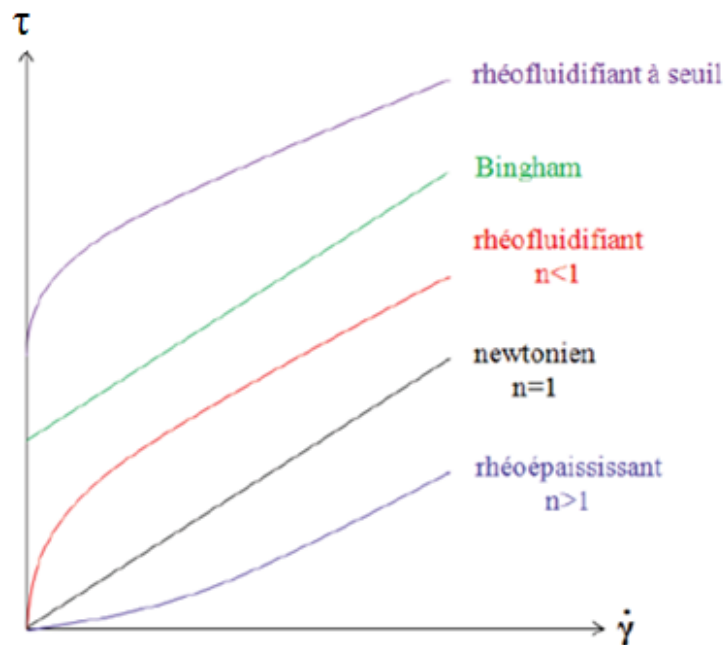
La viscosité dynamique est indépendante de la contrainte appliquée et du temps. Elle ne dépend que de la température, de la pression et de la nature du fluide.



**Figure II.4 :** Viscosité d'un liquide newtonien

### II.3.2- Fluides non newtoniens au comportement indépendant du temps [10]

Dans la famille des fluides non newtoniens, on rencontre plusieurs types de comportements, dont les principaux sont représentés sur la figure (II.5) qui décrit l'allure des différentes courbes d'écoulement (contrainte en fonction du taux de cisaillement).



**Figure II.5 :** Allure des courbes d'écoulement des principaux types de fluides non newtoniens



### **II.3.2.1 Fluides rhéofluidifiants**

Ces fluides ont une viscosité qui diminue lorsque le taux de cisaillement augmente. De nombreux fluides montrent ce comportement : sang, shampoing, peintures ou encore solutions de polymères. Pour les solutions de polymères, ce comportement est attribuable à la séparation de macromolécules enchevêtrées puis à leur alignement dans le sens de l'écoulement au fur et à mesure de l'augmentation du taux de cisaillement. Dans les suspensions la diminution de la viscosité provient de la disparition progressive des structures organisées. L'allure de la courbe d'écoulement est représentée sur la Figure II.5. De nombreux modèles ont été élaborés pour rendre compte de l'écoulement rhéofluidifiant d'un fluide, donnant autant de modèles phénoménologiques pour la viscosité.

Comme exemples de fluide rhéofluidifiant, on peut citer : le jus de fruits concentrés, la moutarde, la purée de fruits, la peinture et le ketchup.

### **II.3.2.2 Fluides rhéoépaississants**

Ce sont des fluides dont la viscosité croît avec le taux de cisaillement. Le rhéoépaississement est beaucoup plus rarement observé que la rhéofluidification. Toutefois certaines suspensions concentrées (amidon de maïs par exemple) et le sable mouillé ont un comportement rhéoépaississant. Un fluide peut être rhéoépaississant pour une certaine gamme de taux de cisaillement, et rhéofluidifiant voire newtonien pour d'autres gammes. L'allure de la courbe d'écoulement est représentée sur la figure (II.5). Parmi les fluides qui ont un comportement rhéoépaississant, on trouve les suspensions à concentration élevée (> 50%) et le mélange maïzena/eau.

Ces fluides non newtoniens sont représentés, en général, par une loi de puissance ou encore loi d'Ostwald waele.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$\tau$  : Contrainte de cisaillement en Pa

$\dot{\gamma}$  : Vitesse de cisaillement en  $\text{s}^{-1}$

K : Indice de consistance en  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$

n : Indice d'écoulement sans dimension avec  $0 < n < 1$

L'indice d'écoulement  $n$  dépend du fluide considéré et caractérise son comportement.

On a ainsi :

$$\mu = K\dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (\text{II.7})$$

Pour  $n=1$  on a  $\mu = K\dot{\gamma}^{(0)} = K = \text{constante}$  le fluide est donc newtonien,

Pour  $n<1$ ,  $n-1<0$  donc  $\mu$  diminue avec le taux de cisaillement. Le fluide est donc rhéofluidifiant.

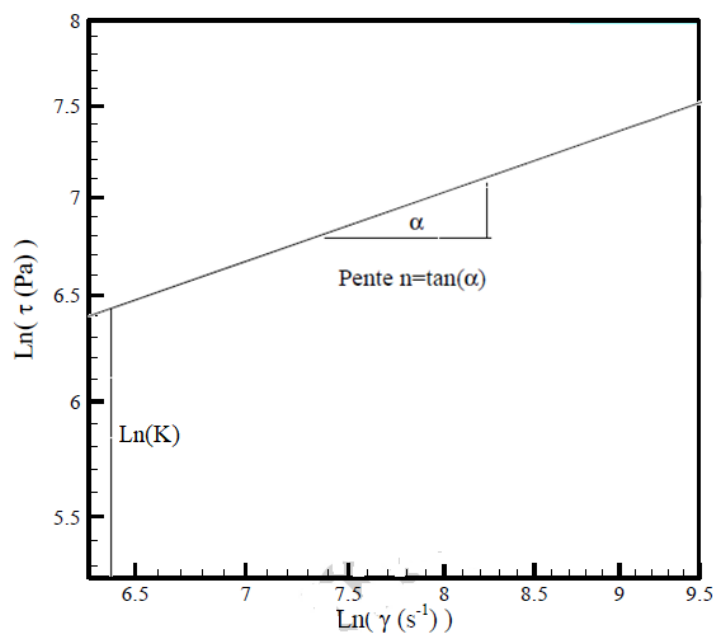
Pour  $n>1$ ,  $n-1>0$  donc  $\mu$  augmente avec le taux de cisaillement. Le fluide est donc rhéoépaississant.

De préférence et pour une bonne observation des paramètres de l'équation rhéologique d'état, on trace les rhéogrammes expérimentaux dans les coordonnées "Ln-Ln", c'est-à-dire la régression linéaire, afin de transformer la courbe en droite (voir Figure II.6).

Lorsqu'on fait le logarithme de l'équation (II.6), on aura :

$$\ln(\tau) = \ln(K) + n\ln(\dot{\gamma}) \quad (\text{II.8})$$

L'indice rhéologique ( $n$ ) représente donc la pente de la droite et l'indice de consistance ( $K$ ) est donné par le point de rencontre de la courbe avec l'axe des ordonnées. [11]



**Figure II.6 :** Diagramme logarithmique contrainte de cisaillement - taux de cisaillement

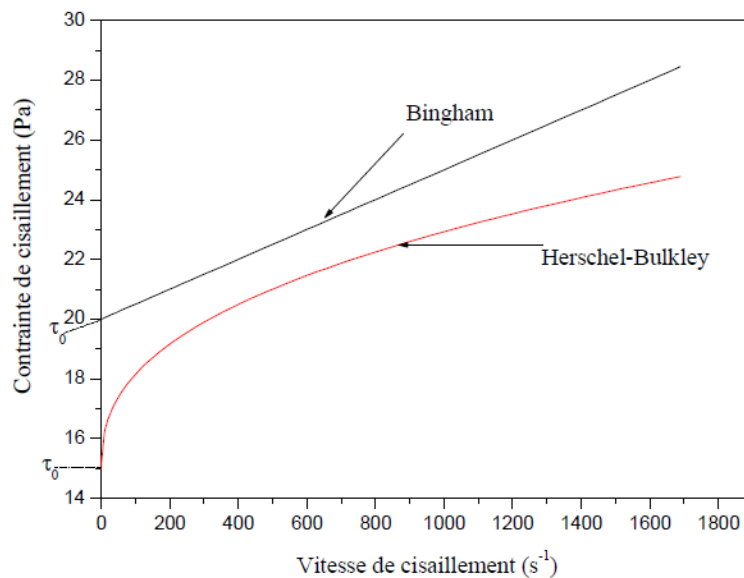
### II.3.2.3 Fluides à seuil

Ces fluides ne s'écoulent qu'à partir d'une certaine contrainte, dite contrainte seuil ( $\tau_0$ ). En dessous de celle-ci, ils se comportent comme des solides et au-delà ils s'écoulent comme un fluide newtonien ou rhéofluidifiant. Cette propriété se rencontre dans certaines solutions de polymères et suspensions très concentrées, et dans la vie courante avec le dentifrice, le yaourt, le ketchup ou encore les argiles (laponite et bentonite par exemple) et les boues de forage. Ce comportement peut être interprété par la présence d'agrégats dans le matériau ou de gels qui subsistent jusqu'à la contrainte seuil. Pour une suspension concentrée, un réseau d'interactions peut en effet exister et doit être brisé pour provoquer l'écoulement de la suspension. Les deux modèles les plus utilisés pour caractériser les fluides à seuils sont, respectivement, le modèle de Bingham (1922) et le modèle de Herschel-Bulkley (1926) (figure II.7) :

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{II.9})$$

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{II.10})$$

Où  $\mu_{pl}$  est la viscosité plastique,  $k$  la consistance du fluide et  $n$  l'indice d'écoulement. Ces deux modèles permettent de représenter le comportement rhéologique de beaucoup de fluides au-delà de la contrainte seuil. [11]



**Figure II.7 :** Courbe d'écoulement d'un fluide à seuil

### II.3.3- Fluides non newtoniens au comportement dépendant du temps

#### II.3.3.1- La thixotropie

Les fluides thixotropes ont une viscosité qui diminue avec le temps quand on leur applique une contrainte constante. Après suppression de cette contrainte on ne retrouve la viscosité initiale qu'après un certain temps plus ou moins long (Figure. II.8). C'est un phénomène réversible. Plusieurs matériaux ont un comportement thixotropique tels que : la moutarde, le ketchup, le yaourt, les peintures, les boues de forage, la pate de gypse et certains polymères.

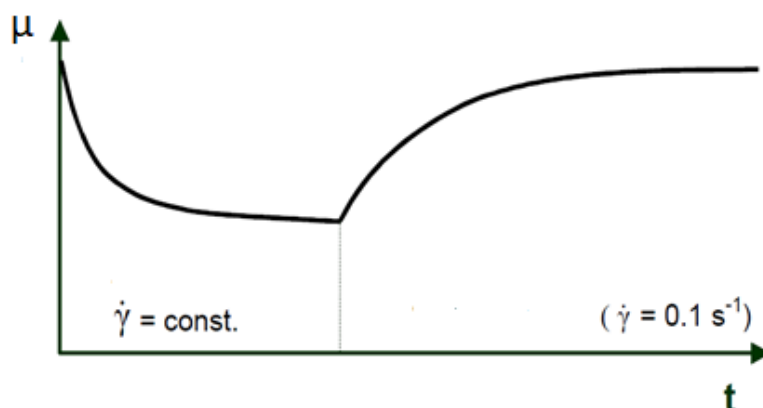


Figure II.8 : courbe viscosité-temps d'un matériau thixotrope

#### II.3.3.2- La Antithixotropie

Les fluides antithixotropes (aussi appelés fluides rhéopexes) sont des fluides qui deviennent de plus en plus solides au fur et à mesure qu'on leur applique une contrainte de cisaillement. Ils reviennent généralement à leur état initial (moins visqueux) après un temps variable lorsque la contrainte de cisaillement n'est plus présente (Figure. II.9).

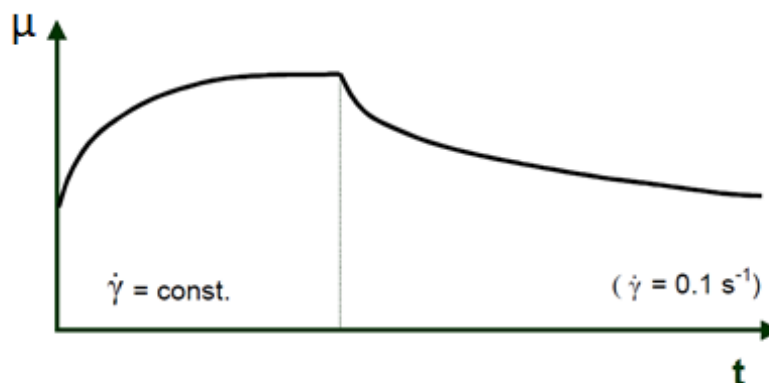


Figure II.9: courbe viscosité-temps d'un matériau rhéopexique

### **II.3.4 - Fluides viscoélastiques**

Le caractère viscoélastique est un comportement non-Newtonien très important et très fréquent pour plusieurs matériaux. La réponse du fluide à une déformation présente à la fois un aspect élastique (contrainte proportionnelle à la déformation) et un aspect visqueux (contrainte proportionnelle à la vitesse de déformation).

Dans le premier cas, le temps caractéristique de la sollicitation est inférieur à un temps caractéristique du matériau, les composants élémentaires n'ont pas le temps de se déformer de manière importante et on observe une réponse élastique. Lorsque le temps de sollicitation est plus grand que le temps caractéristique du matériau, la réponse est de type visqueux. Le modèle le plus simple de fluide viscoélastique consiste à additionner les contraintes d'origine élastique et les contraintes d'origine visqueuse :

$$\tau = \tau_{\text{élast}} + \tau_{\text{visq}} = E\gamma + \mu\dot{\gamma} \quad (\text{II.11})$$

Où  $E$  est un module d'élasticité et  $\gamma$  est la déformation et  $\mu$  est la viscosité.

## **II.4- Les rhéomètres**

### **II.4.1- Présentation**

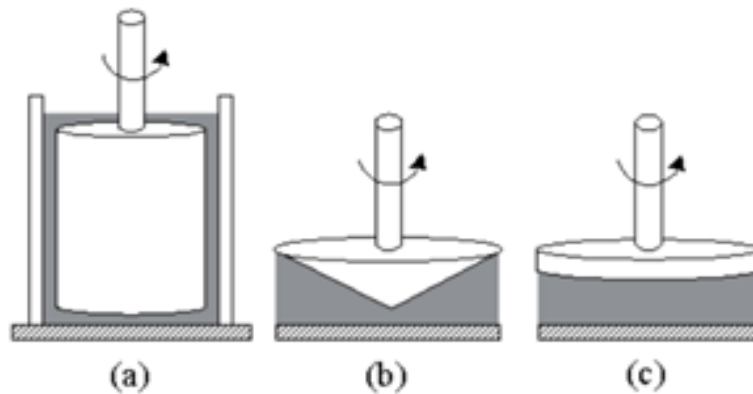
Les rhéomètres permettent d'obtenir des rhéogrammes qui servent à décrire les propriétés d'écoulement d'un matériau. La représentation la plus courante consiste à exprimer la variation de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$ .

Il existe au moins deux grandes familles de rhéomètres : les rhéomètres rotatifs et les rhéomètres capillaires.

### **II.4.2- Les rhéomètres rotatifs**

En rhéomètre rotative, le fluide est soumis à un cisaillement entre deux surfaces, l'une en rotation autour de son axe (le rotor) et l'autre immobile (le stator). Il existe trois géométries rotor/stator différentes : plan-plan, cône-plan ou bien encore à cylindres coaxiaux (plus communément appelée géométrie de Couette) (Figure. II.10). Les grandeurs rhéologiques accessibles sont d'une part le taux de cisaillement déterminé à partir de la géométrie de la surface et de la vitesse de rotation, et d'autre part, la contrainte de cisaillement mesurée à partir du couple à appliquer pour maintenir le mouvement du rotor. Ces deux grandeurs

permettent d'établir le rhéogramme  $\tau = f(\dot{\gamma})$ , signature de l'écoulement du matériau, et d'en déduire la viscosité dynamique par exemple.



**Figure II.10** : Différentes géométries de rhéomètres rotatifs : (a) Couette (b) Cône-Plan (c) Plan-Plan.

## II.5- Lois rhéologiques des suspensions

### II.5.1- Présentation

Dans le domaine des nanofluides, on peut distinguer deux types de suspensions. Une suspension diluée se caractérise par une très faible fraction volumique en espèce solide. Les particules étant très éloignées les unes des autres, aucune interaction à courte ou longue distance ne vient perturber leur trajectoire. Pour ce type de suspension, la viscosité augmente linéairement en fonction de la concentration en éléments solides. Les suspensions concentrées, sont caractérisées par des concentrations volumiques qui dépassent 50 %.

La littérature contient de nombreuses équations gouvernant la viscosité dynamique  $\mu$  d'une suspension à partir de la viscosité dynamique du fluide hôte  $\mu_0$  et de la fraction volumique en espèces solides  $\phi$ .

### II.5.2- Loi d'EINSTEIN

Einstein a été le premier qui a étudié l'évolution de la viscosité d'une suspension diluée en fonction de la fraction volumique de solide [12]. Il a lié la viscosité à la dissipation d'énergie dans la suspension par des particules sphériques et rigides. Einstein a finalement abouti à une relation simple valable uniquement dans le cas d'une suspension très diluée ( $\phi < 0,02$ ) de sphères mono dispersées [12,13] :

$$\mu_{\eta f} = \mu_f (1 + 2,5\varphi) \quad (\text{II.12})$$

Avec  $\varphi = \frac{V_s}{V_s + V_f}$  la fraction volumique de solide,  $V_s$  le volume de la phase solide en suspension et  $V_f$  le volume du fluide hôte.

### II.5.3- Loi des suspensions concentrées

Dans le domaine des suspensions concentrées ( $\varphi > 0,5$ ), des relations empiriques ou semi empiriques basées en partie sur la relation d'Einstein ont été développées [12]. Dans ce domaine, la viscosité de la suspension n'est plus essentiellement gouvernée par la viscosité du fluide hôte et la fraction volumique solide mais elle dépend également de l'organisation optimale de cette fraction solide à sec, caractérisée par la compacité maximale d'empilement granulaire  $\varphi_m$ .

Il y a trois relations fréquemment utilisées dans le domaine des suspensions concentrées :

Équation de Mooney [12] :

$$\mu = \mu_n \exp \frac{2,5\varphi}{1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}} \quad (\text{II.13})$$

Équation de Krieger-Dougherty [13] :

$$\mu_{nf} = \mu_n \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-2,5\varphi_m} \quad (\text{II.14})$$

$\mu_{nf}$  : la viscosité de la suspension

$\mu_n$  : La viscosité du milieu.

$\varphi$  : est la concentration en volume des particules

$\varphi_m$  : La compacité maximale d'empilement granulaire

Équation de Quémada [14] :

$$\mu_{nf} = \mu_n \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-2} \quad (\text{II.15})$$

$\mu_{nf}$  : La viscosité de la suspension

$\mu_n$  : La viscosité du milieu.

$\varphi$  : est la concentration en volume des particules

$\varphi_m$  : La compacité maximale d'empilement granulaire

---

# Chapitre 3

## Etude expérimentale

---



### III.1 Introduction

Une série de mesures expérimentales a été réalisée sur un rhéomètre MCR 302 au sein du laboratoire de Fluides Industriels, Mesures et Application (FIMA) à l'université Djilali Bounaama de Khemis Miliana. L'objectif de ces essais expérimentaux est d'étudier le comportement rhéologique du nano-lubrifiant  $\text{Fe}_2\text{O}_3/10\text{W}40$ . Ainsi, on a mesuré la viscosité apparente du nano-lubrifiant en fonction de plusieurs paramètres tels que: le taux de cisaillement, la fraction volumique et la température. Ces mesures sont effectuées dans un intervalle de température de  $20^\circ\text{C}$  à  $60^\circ\text{C}$ . Dans ce chapitre, on définit l'huile de base et les nanoparticules utilisées, on présente aussi la procédure de préparation des échantillons de nano-lubrifiant. Le déroulement des essais est aussi présenté avec détaille.

### III.2 Présentation des nano-particules d'oxyde de fer $\text{Fe}_2\text{O}_3$

L'oxyde de fer(III), également appelé oxyde ferrique, est le composé chimique de formule  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , dont la forme minérale est l'hématite. C'est un oxyde paramagnétique stable du fer, dont une forme hydratée constitue la rouille. Il est de couleur ocre à rouille sous forme pulvérulente ce qui donne notamment sa couleur à la planète Mars mais grise à noire sous forme cristallisée. Il est l'un des trois oxydes principaux du fer, les deux autres étant l'oxyde de fer(II)  $\text{FeO}$ , plutôt rare, et l'oxyde de fer (II,III)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Les caractéristiques des nanoparticules  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont énumérées dans le tableau III.1. La figure III.1 montre une photographie des nanoparticules de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

**Tableau III.1 :** Caractéristiques des nanoparticules d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Caractéristiques	Valeurs
Pureté	85 %
Point de fusion	1124 °C
Masse molaire	159,69 g/mol
Masse volumique	5.24 g/cm <sup>3</sup>
Couleur	brique rouge
Eléments d'impuretés	Pb 0,01%
	Cl 0,01%
	SO <sub>4</sub> 0,05%



**Figure III. 1 :** photographie des nanoparticules de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### **III.3 Présentation de l'huile SAE 10W40**

L'huile SAE 10W40 est une huile de marque CASTROL, fabriquée par British Petroleum (BP) en Belgique. C'est une huile de type synthétique, conçue pour les moteurs à essence et diesel à quatre temps les plus récents. Assure le refroidissement, le nettoyage et la protection du moteur contre les dépôts pour prolonger la durée de vie du moteur, elle est commercialisée sous le format bidon de 5 litres. La vidange est préconisée tous les 10000 Km. Les caractéristiques de l'huile SAE 10W40 sont énumérées dans le Tableau III.2.

La Figure III.2 montre une photographie de l'emballage commercial de cette huile.

**Tableau III.2 :** Caractéristiques de l'huile SAE10W40 [15]

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique à 15°C	0.8631 g/ml
Viscosité cinématique à 100°C	14.6 mm <sup>2</sup> /s
Viscosité, CCS -25°C (10W)	6730 mPa.s (cP)
Viscosité cinématique à 40°C	97 mm <sup>2</sup> /s
Indice de viscosité	156
Point d'écoulement	-33 °C
Point d'éclair	202 °C
Nombre total de base (TBN)	8.07 mg KOH/g
Cendres sulfatées	1.0 % m



**Figure III.2 :** Photographie de l'emballage commercial de l'huile SAE10W40

### **III.4 Préparation des échantillons**

Pour préparer les échantillons du nano lubrifiant, on a utilisé la méthode en deux étapes. Trois échantillons ont été préparés avec des fractions volumiques de 0,5%, 1% et 2%. Pour cela on a utilisé l'équation (III.1) de la fraction volumique ci-dessous pour déterminer la masse de la nanoparticule de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Equation III.2) correspondante à chaque fraction volumique avant d'être dispersé dans l'huile moteur 10W40.

$$\phi = \frac{v_p}{v_p + v_f} = \frac{\left(\frac{m}{\rho}\right)_p}{\left(\frac{m}{\rho}\right)_p + \left(\frac{m}{\rho}\right)_f} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

$$m_p = \frac{\left(\frac{m}{\rho}\right)_f}{\frac{100}{\phi} - 1} \rho_p \quad (\text{III.2})$$

Connaissant la masse de l'huile utilisée  $m_f = 77.3430 \text{ g}$  et la masse volumique de la nanoparticule et de l'huile  $\rho_p = 5,24 \text{ g/cm}^3$  et  $\rho_h = 0,8631 \text{ g/ml}$  respectivement.

Les masses des nanoparticules calculées correspondantes à chaque fraction volumique sont données dans le tableau III.3.

**Tableau III.3 :** Masse de nanoparticule Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fraction volumique $\phi$	Masse de nanoparticule Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0,5 %	2, 3595 g
1 %	4, 7430 g
2 %	9, 5828 g

Une fois la masse de la nanoparticule calculée, cette quantité est pesée à l'aide d'une balance de précision (Figure. III.3). Cette quantité de nanoparticule est ajoutée à l'huile SAE10W40. Le mélange est ensuite agité à l'aide d'un agitateur magnétique (Figure. III.4) pendant 3 heures pour obtenir un mélange homogène et uniforme.

Cette manipulation est répétée pour les autres échantillons pour obtenir trois échantillons avec des concentrations de 0.5%, 1% et 2% en plus de l'échantillon de l'huile pure (0%) (Figure. III.5).



**Figure III.3 :** Balance de précision



**Figure III.4 :** Agitateur magnétique



**Figure III.5 :** Photographie d'échantillons de nano-lubrifiants et d'huile moteur **10W40**

### ***III.5 Déroulement des essais***

Après l'étape de préparation des échantillons, on a entamé la phase des mesures rhéologiques. Ces mesures sont réalisées essentiellement sur un rhéomètre rotatif à contrainte imposée MCR302 (Fig.III.6). D'autres accessoires sont utilisés pour le fonctionnement du rhéomètre tel que le compresseur à air qui alimente le palier à air de l'arbre tournant du rhéomètre, le bain de circulation utilisé pour réguler la température dans la cellule de mesure et un ordinateur muni d'un logiciel d'exploitation.

On commence par le premier échantillon avec l'huile pure ( $\emptyset = 0\%$ ). Le but de la manipulation est de mesurer la viscosité ( $\mu$ ) et la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du taux de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ). Après le lancement du logiciel du rhéomètre, on choisit un nouveau projet, on choisit le type de fluide (liquide de faible viscosité), ensuite, on choisit le type d'application (rotation, courbe d'écoulement). 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. On monte la géométrie de mesure : système à double entrefer (Figure III.7).

Pour la configuration des paramètres de mesure : 20 points de mesure ont été sélectionnés et le taux de cisaillement varie de 100 à 2000  $s^{-1}$ . La température est fixée à 20 °C.

On déplace la tête de l'instrument vers le haut et on charge l'échantillon à l'aide d'une seringue. On abaisse le corps de mesure en position de mesure, si l'échantillon déborde légèrement, on retire l'excédent d'échantillon jusqu'en haut du cylindre situé au centre du godet.

On règle la position de mesure (gap zéro), et on démarre les mesures. Pour le même échantillon, cette manipulation est effectuée pour les autres températures à savoir 30, 40, 50 et 60 °C. La même manipulation est répétée avec les autres échantillons (0,5%, 1% et 2%).



**Figure III.6 :** Rhéomètre Anton Paar MCR 302



**Figure III.7 :** géométrie de mesure à double entrefer

---

# Chapitre 4

## Résultats et discussion

---

### IV.1 Introduction

Les résultats des essais rhéologiques réalisés sur le rhéomètre sont exploités pour étudier le comportement rhéologique de l'huile de base ainsi que le comportement rhéologique du nano-lubrifiant en fonction de plusieurs paramètres tels que : la température, le taux de cisaillement et la concentration volumique de la nanoparticule.

La relation d'Ostwald-de Waele est utilisée pour identifier le comportement rhéologique des fluides, cette équation est la suivante:

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

Où  $n$  est l'indice de la loi de puissance,  $K$  est l'indice de consistance et  $\tau$  est la contrainte de cisaillement. La viscosité des fluides qui suit la loi de puissance est définie par l'équation:

$$\mu = K\dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (\text{IV.2})$$

Dans l'équation (IV.2),  $\mu$  représente la viscosité apparente et  $\dot{\gamma}$  est le taux de cisaillement.  $n$  détermine le comportement rhéologique des fluides, si  $n$  est égale à 1 alors le fluide est Newtonien, si sa valeur est différente de 1 alors le fluide est non newtonien.

Afin d'obtenir les indices  $n$  et  $K$ , le diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement est tracé, puis les indices sont calculés par l'équation ci-dessous:

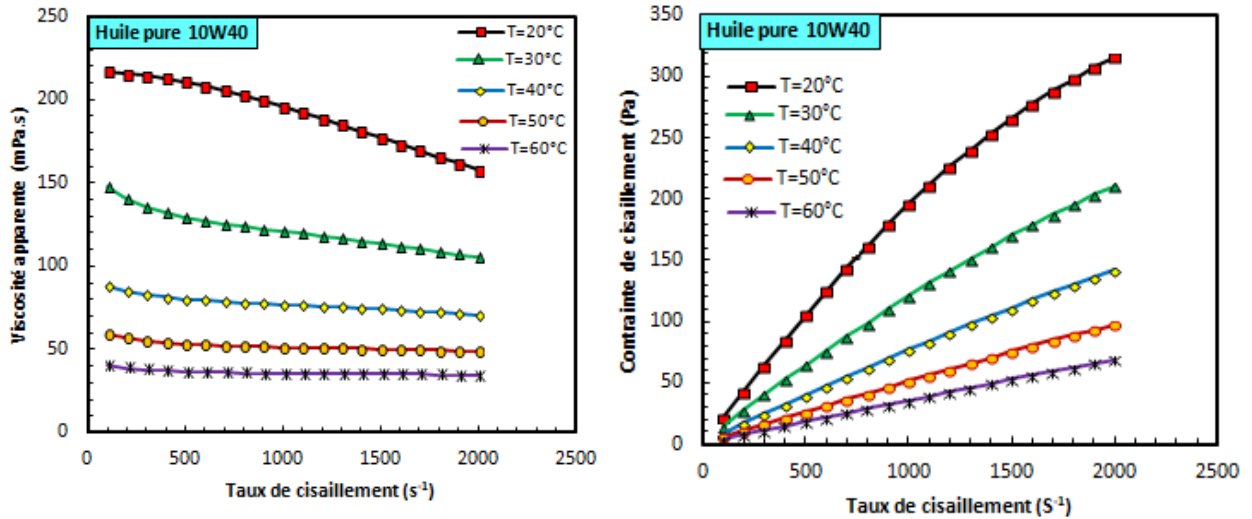
$$\ln(\tau) = \ln(K) + n\ln(\dot{\gamma}) \quad (\text{IV.3})$$

### IV.2 Comportement rhéologique de fluide de base

On commence par l'étude du comportement rhéologique de l'huile de base 10W40. La figure (IV.1) représente les variations de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement. Sur cette figure, on remarque que lorsque la température est constante, l'augmentation du taux de cisaillement conduit à une réduction non linéaire de la viscosité apparente. Cette tendance représente un comportement rhéofluidifiant du fluide. On peut constater aussi que le changement de la viscosité par rapport au taux de cisaillement est différent d'une température à l'autre. Comme on peut l'observer, à haute température, la variation de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement est insignifiante et le fluide tend vers un comportement Newtonien.

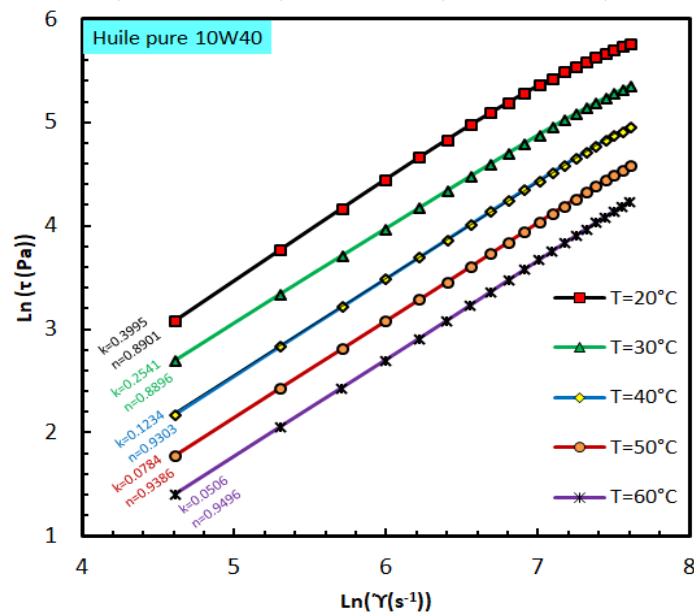
En utilisant l'équation (IV.3), tous les indices peuvent être déterminés, de même que le comportement du lubrifiant.





**Figure IV.1 :** Variations de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement à différentes températures pour l'huile moteur 10W40.

La figure (IV.2) montre le diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement. Les indices  $n$  et  $K$  sont regroupés dans le tableau (IV.1), D'après ce tableau, les indices à toutes les températures sont inférieurs à 1 ce qui signifie que les fluides sont non newtoniens avec un comportement rhéofluidifiant. Le comportement non newtonien le plus remarquable a été enregistré sur la température de 30° C.



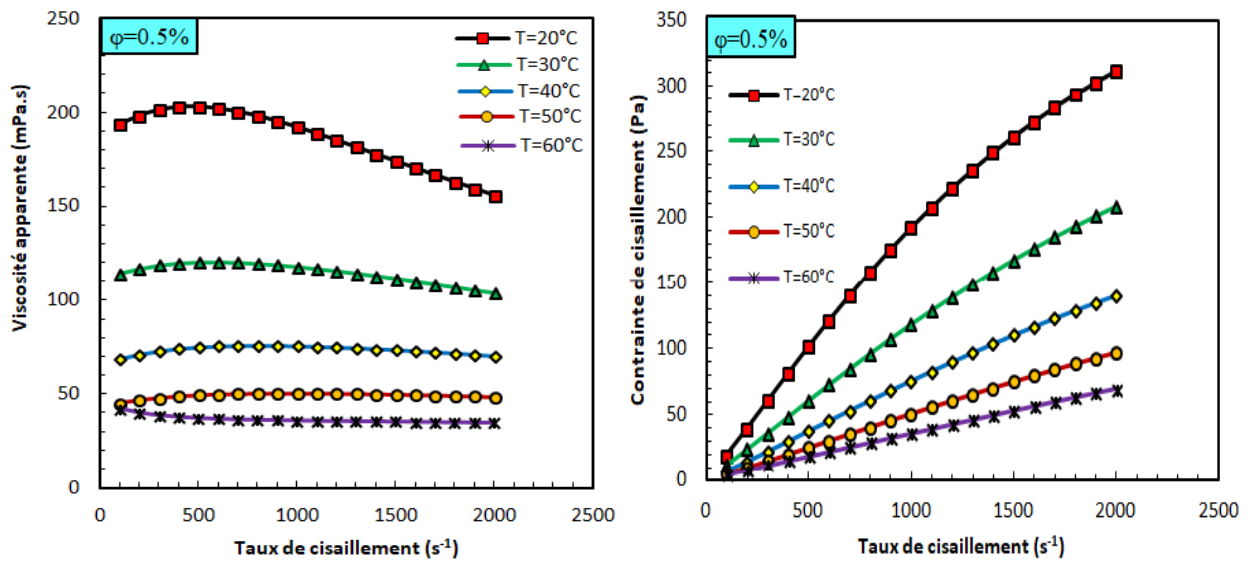
**Figure IV.2 :** Diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour l'huile 10W40.

**Tableau IV.1 :** Indices de la loi de puissance et de consistance de l'huile de base.

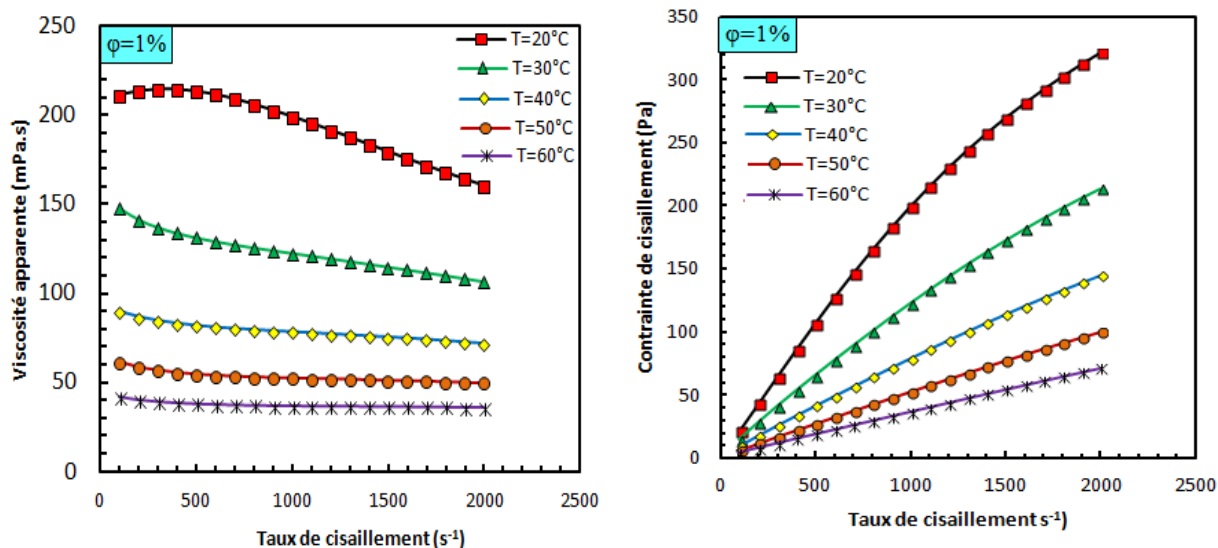
T(°C)	Indice de la loi de puissance	Indice de consistance
20	0.8901	0.3995
30	0.8896	0.2541
40	0.9303	0.1234
50	0.9386	0.0784
60	0.9496	0.0506

**IV.3 Comportement rhéologique du nano-lubrifiant:**

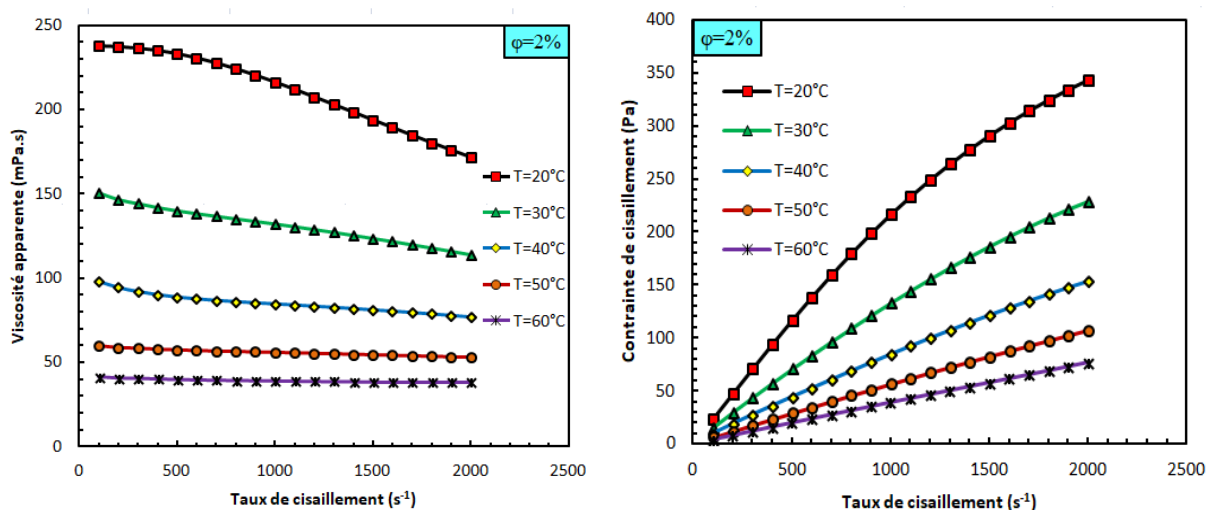
Les figures (IV.3), (IV.4) et (IV.5) représentent les variations de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour le nano-lubrifiant Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10W40 avec une fraction volumique solide de 0.5%, 1% et 2% respectivement. Pour les trois concentrations, la viscosité varie en fonction du taux de cisaillement à toutes les températures.



**Figure IV.3 :** Variations de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 0.5%.

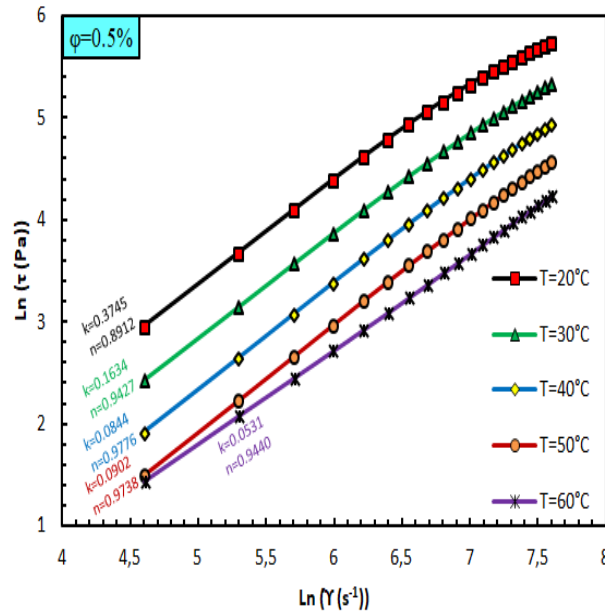


**Figure IV.4 :** Variations de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 1%.

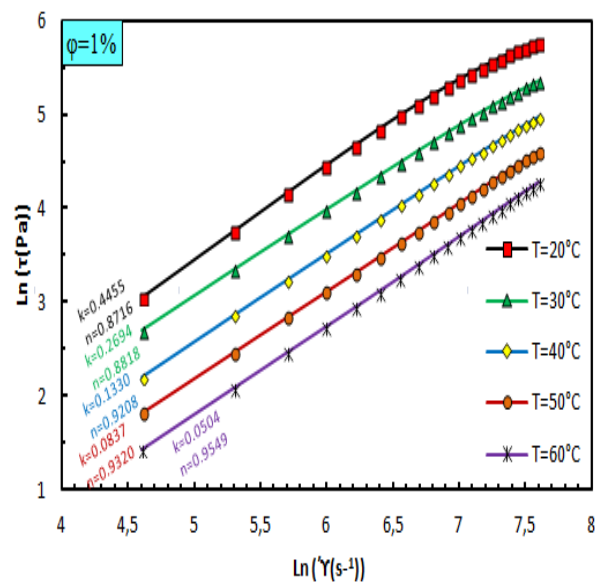


**Figure IV.5 :** Variations de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 2%.

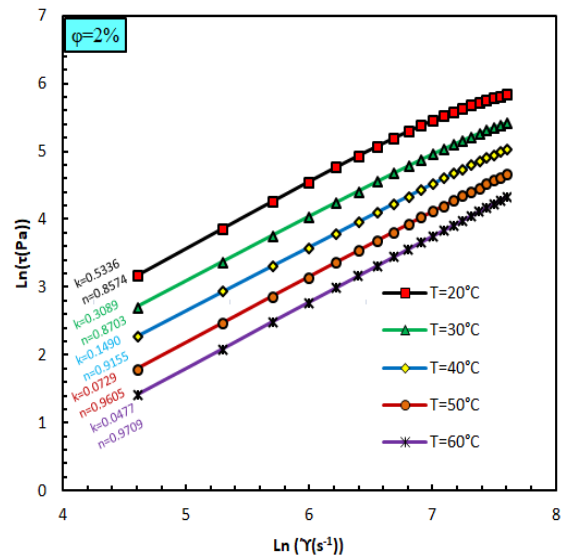
Les figures (IV.6), (IV.7) et (IV.8) montrent le diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement à différentes températures pour les échantillons avec 0.5%, 1% et 2% de fraction volumique solide respectivement. L'indice de la loi de puissance et l'indice de consistance pour chaque concentration et à différentes températures ont été calculés à partir de ces courbes. Les résultats donnant les indices  $n$  et  $K$  sont énumérés dans le tableau (IV.2) et (IV.3).



**Figure IV.6 :** Diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes températures pour l'échantillon avec 0.5% de fraction volumique solide.



**Figure IV.7 :** Diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes températures pour l'échantillon avec 1 de fraction volumique solide.



**Figure IV.8 :** Diagramme logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes températures pour l'échantillon avec 2% de fraction volumique solide.

Selon le tableau (IV.2) et indépendamment de la température et de la fraction volumique solide. Le nano-lubrifiant  $\text{Fe}_2\text{O}_3/10\text{W}40$  est un fluide non newtonien avec un comportement rhéofluidifiant. L'ajout de nanoparticules de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  à l'huile de base modifie brusquement la structure de l'huile de base qui provoque l'interruption des liaisons moléculaires et les nanoparticules agit comme des interfaces qui connectent les couches d'huile les unes aux autres. D'un autre côté, la différence entre la nature brownienne des nanoparticules et l'huile de base conduit à briser les liens et former de nouveaux liens, ainsi le nano-lubrifiant  $\text{Fe}_2\text{O}_3 / 10\text{W}40$  montre un comportement rhéofluidifiant.

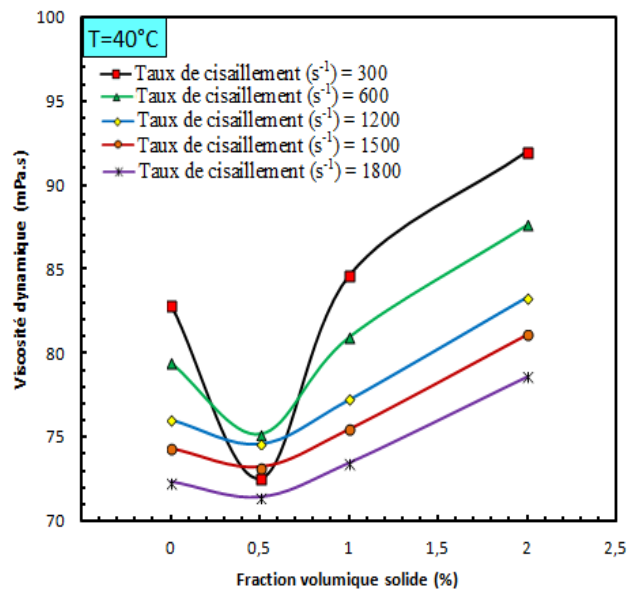
**Tableau IV.2 :** Indices de la loi de puissance du nano-lubrifiant  $\text{Fe}_2\text{O}_3 / 10\text{W}40$ .

Fraction volumique solide			
T (°C)	0,5	1	2
20	0,8912	0,8716	0,8574
30	0,9427	0,8818	0,8703
40	0,9776	0,9208	0,9155
50	0,9738	0,9320	0,9605
60	0,9440	0,9549	0,9709

**Tableau IV.3 :** Indices de consistance du nano-lubrifiant Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / 10W40.

Fraction volumique solide			
T (°C)	0.5	1	2
20	0,3745	0,4455	0,5336
30	0,1634	0,2694	0,3089
40	0,0844	0,1330	0,1490
50	0,0902	0,0837	0,0729
60	0,0531	0,0504	0,0477

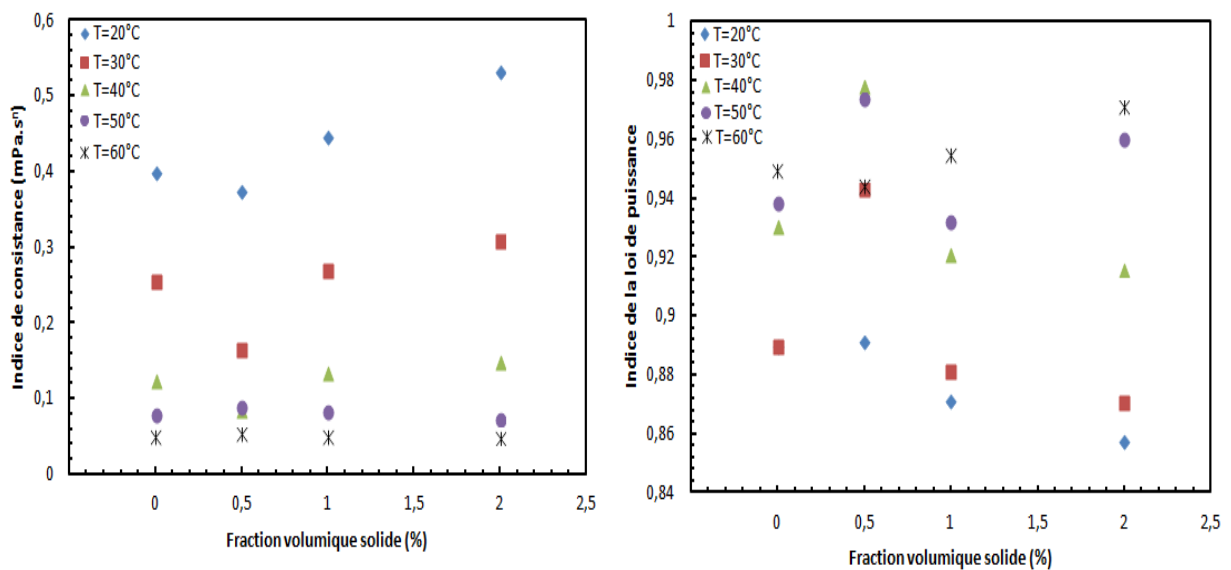
La variation de la viscosité en fonction de la fraction volumique à température constante de 40°C à différents taux de cisaillement est représentée sur la figure IV.9. D'après cette figure, à une vitesse de cisaillement spécifique, la viscosité dynamique diminue pour une faible fraction volumique (entre 0 et 0.5%), au-delà d'une fraction volumique de 0.5%, la viscosité est améliorée. Par contre en raison du comportement rhéofluidifiant du nano-lubrifiant Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/10W40 et de l'huile de base, on remarque qu'avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement pour une fraction volumique constante la viscosité est réduite.



**Figure IV.9 :** Diagramme de la viscosité apparente en fonction de la fraction volumique pour une température de 40°C.

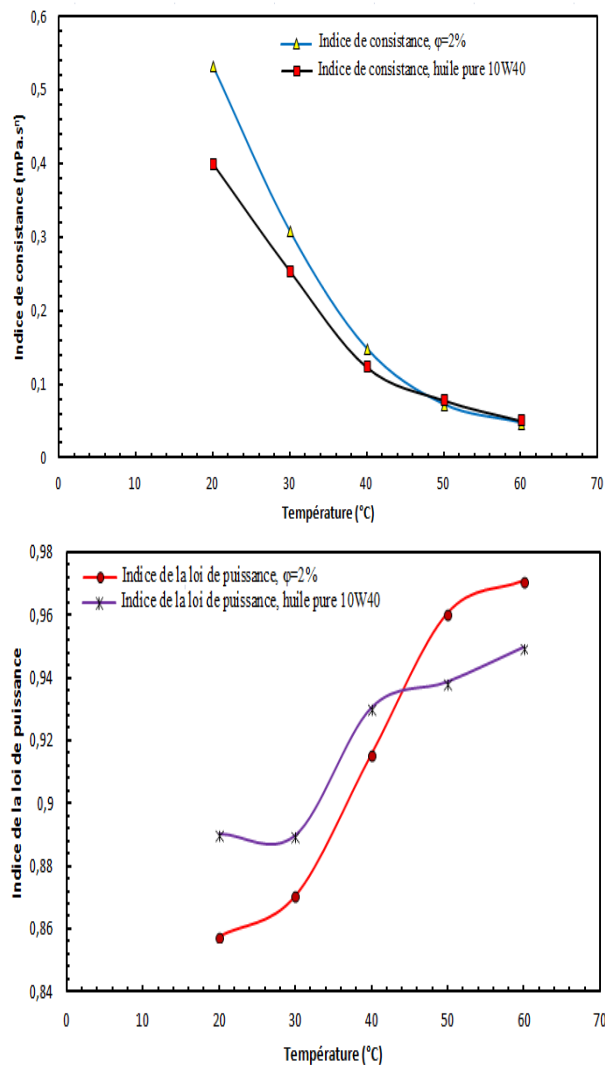
Les variations des indices  $n$  et  $k$  en fonction de la fraction volumique solide sont illustrées dans la figure IV.10. Selon les variations de  $k$ , on peut voir que pour les températures constantes de 40°C, 50°C et 60°C, l'augmentation de la fraction volumique solide n'a pas d'effet significatif sur l'indice de consistance. Les indices de consistance pour les échantillons de 0,5% à 2% étaient presque les mêmes, autrement dit, la viscosité n'est pas modifiée. Par contre pour les faibles températures (20°C et 30°C), on a une augmentation de l'indice de consistance à partir d'une fraction volumique de 0.5%.

En ce qui concerne le diagramme de l'indice de la loi de puissance, et pour toutes les températures, le changement de la fraction volumique solide à un effet plus au moins insignifiant sur l'indice de la loi de puissance, exception faite pour la fraction volumique solide de 0.5% où l'indice  $n$  change considérablement ce qui révèle l'effet de l'ajout du nano particules à toutes les températures.



**Figure IV.10:** Diagramme de l'indice d'écoulement  $n$  et l'indice de consistance  $k$  en fonction de la fraction volumique.

La figure IV.11 illustre les effets de la température sur le comportement rhéologique de l'huile de base pure et de l'échantillon de nano-lubrifiant  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -10W40 avec une fraction volumique de 2%. D'après cette figure, l'indice de la loi de puissance augmente rapidement au-delà de 30°C avant sa stabilisation autour de 60°C, mais les échantillons gardent toujours un comportement non Newtonien. Aussi l'indice de consistance a été affecté par la température de sorte que l'augmentation de la température réduit l'indice k de 0,52 à 0,04. Au-delà de 50°C, on remarque une convergence des deux courbes, ce qui signifie que l'effet de la température est plus dominant que l'effet de l'ajout du nanoparticule.



**Figure IV.11:** Diagramme de l'indice de la loi de puissance et l'indice de consistance en fonction de la température.



---

# Conclusion générale

---

## *Conclusion générale*

Pour identifier les caractéristiques des nano-lubrifiants, le comportement rhéologique du nano-lubrifiant  $\text{Fe}_2\text{O}_3/10\text{W}40$  a été étudié à différentes températures et pour différentes fractions volumiques solides. Pour réaliser ce travail, divers échantillons avec des fractions volumiques solides de 0%, 0,5%, 1%, et 2% ont été étudiés. La viscosité des échantillons a été mesurée à différentes températures allant de 20°C à 60°C et des taux de cisaillement entre 100  $\text{s}^{-1}$  et 2000  $\text{s}^{-1}$  avec un rhéomètre modulaire compact MCR302.

Les principales conclusions dégagées de ce travail sont énumérées ci-dessous :

**(a)** Une variation non linéaire de la viscosité en fonction du taux cisaillement ce qui signifie que l'huile de base et le nano-lubrifiant sont des fluides non-newtoniens.

**(b)** Le comportement rhéofluidifiant de l'huile de base et du nano-lubrifiant a été révélé par le calcul de la loi de puissance et les indices de consistance en utilisant la relation d'Ostwald-de Waele.

**(c)** A une vitesse de cisaillement spécifique, la viscosité dynamique diminue pour une faible fraction volumique (entre 0 et 0.5%), au-delà d'une fraction volumique de 0.5%, la viscosité est améliorée. Par contre pour une fraction volumique constante la viscosité est réduite avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement.

**(d)** Pour les faibles températures (20°C et 30°C), on a une augmentation de l'indice de consistance en fonction de la fraction volumique des nanoparticules. A haute température, l'effet de la température est plus dominant que l'effet de l'ajout des nanoparticules.

---

# Références bibliographiques

---

*Références bibliographiques*

- [1] <http://www.cooling-masters.com/articles-46-1.html>
- [2] Ribeiro J., P., Gruss J., A. : Nanofluides pour les applications thermiques, technique de l'ingénieur, 2e édition. (2009).
- [3] Elena V Timofeeva: Nanofluids for Heat Transfer : nanoscale research letters, special issue on nanofluides. (2010).
- [4] Einstein A. : Investigations on the Theory of the Brownian Movement. Dover Publications, New York. (1956).
- [5] Brinkman H.C. : The viscosity of concentrated suspensions and solution. J. Chem. Phys., 20, 571–581. (1952).
- [6] Maxwell J.C. : A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K. (1891).
- [7] Hamilton R.L. and Crosser O.K. : Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 1(3), 187-191. (1962).
- [8] Pak B.C. and Cho Y.I. : Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer, 11(2), 151–170. (1998).
- [9] Xuan Y. and Roetzel W. : Conception for heat transfer correlation of nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43(19), 3701-3707. (2000).
- [10] Faouad Chabane : contribution à la modélisation de transfert de chaleur lors du remplissage d'un moule. Thèse de Magistère. Université de Batna. (2009)
- [11] Hammadi L. : Cours Rhéologie des fluides complexes : Chapitre 2 : Fluides Non-Newtoniens. Université des Sciences et Technologie Mohamed Boudiaf. Oran.
- [12] Guillemin J.P., Werckerle A., Brunet L., Bonnefoy O., Thomas G.: Application d'un modèle de viscosité à la coulée d'explosifs : Modélisation du temps de coulée. Rhéologie 10 (2006) 40-48.

- [13] Nguyen C.T., Desgranges F., Roy G., Galanis N., Maré T., Boucher S., Angue Mintsa H.: Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids- Hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 28 (2007) 1492-1506.
- [14] Assael M. J., Chen C. F., Metaxa I., and Wakeham W. A. : Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water. *International Journal of Thermophysics*, 25 (2004).
- [15] [www.castrol.com/fr\\_fr/france/car-engine-oil/huile-moteur-par-viscosite/10w-40.html](http://www.castrol.com/fr_fr/france/car-engine-oil/huile-moteur-par-viscosite/10w-40.html)