

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

Etude de comportement rhéologique du
nano-lubrifiant ZnO/SAE10W40 pour
les applications automobiles

Préparé par :

LAGHOUATI Nesrine

Soutenu publiquement le : / 07 / 2021, Devant le jury composé de :

Mr: CHAIB Khaled	Maître de Conférences " A"(Univ. Ibn Khaldoun)	Président
Mr : BOUZIDANE Ahmed	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr: ABED Belkacem	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr: KARAS Abdelkader	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2020 - 2021

Dédicace

*Je dédie mon travail à ma plus merveilleuse mère
« Ghania », si je ferais quoi que ce soit, je ne
pourrais pas rendre vos bienfaits merci infiniment
ma mère, je vous remercie d'avoir fait de moi une
femme, et à mes grands-mères « Kheira, Zohra »*

A mes oncles spécialement Faissal, à mes tantes.

*A mes cousins, mes cousines « Mounira, Sihem,
Imen, Manel, Karima et Hafida »*

*A mes amies d'enfances « chergui zohra, Asmaa
Gacemi et Abir benoualli »*

A mes chères amies.

Remerciements

Notre travail expérimental a été effectué à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret, dans le laboratoire de recherche « synthèse et catalyse », ainsi que l'université de Khemis-Miliana dans le laboratoire de recherche « Fluides Industriels Mesures et Applications « FIMA »

Je tiens à remercier tout d'abord ALLAH qui m'a guidé vers le bon chemin et qui m' a donné le courage et la force de continuer ce travail.

J'exprime mon profond remerciement à mon encadreur : Professeur. Abdelkader KARAS, j'ai le grand plaisir de travailler sous sa direction et profiter de ses conseils judicieux, je tiens à remercier infiniment Mr : Ahmed HARCHAOUI qui m'a aidé le long de mon travail.

Je tiens à remercier messieurs les membres du jury pour leurs collaborations durant l'examen de ce travail et leurs participations à la soutenance à savoir :

Monsieur CHAIB Khaled, Maître de Conférences « A » à l'Université Ibn Khaldoun qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury de soutenance.

Monsieur BOUZIDANE Ahmed, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun, Monsieur ABED Belgacem, Maître de Conférences « A » à l'Université Ibn Khaldoun, qui ont accepté d'examiner ce travail. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance.

Je remercie tous les enseignants et les responsables du département de Génie Mécanique.

Un remerciement tout spécial à Monsieur MAZOUZI Ridha Maître de Conférences « A » à l'Université de Khemis-Miliana, pour son aide à tous les niveaux et notamment en partie expérimentale.

Enfin, j'exprime mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Je réserve une pensée chaleureuse à toute ma famille et particulièrement ma mère pour son soutien et ses encouragements.

Sommaire

Dédicace.....	
Remerciements.....	
Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Nomenclatures.....	
Introduction générale.....	

Chapitre I : Notion de base sur la rhéologie

I.1- Introduction.....	1
I.2 -Grandeurs Rhéologique.....	2
I.2.1- la contrainte de cisaillement.....	2
I.2.2-la déformation et la vitesse de cisaillement.....	3
I.2.3- la viscosité.....	4
I.2.3.1- viscosité dynamique-loi de newton.....	5
I.2.3.2-viscosité cinématique.....	5
I.3- Modèles rhéologiques.....	6
I.3.1-Fluides newtoniens.....	6
I.3.2 Fluides non newtoniens -.....	7
I.3.2.1- Fluides non newtoniens indépendants du temps.....	7
I.3.2.1.1-Fluides rhéofluidifiants ou pseudo-plastiques.....	8
I.3.2.1.2-Fluides rhéoépaississants.....	9
I.3.2.1.3-Fluides plastiques.....	9
I.3.2.2-Fluides non newtoniens dépendant du temps.....	12
I.3.2.2.1-Fluides thixotropiques.....	12
I.3.2.2.2- Fluides anti-thixotropiques.....	13
I.3.3-Fluides viscoélastiques.....	13
I.4- les rhéomètres.....	14
I.4.1- Définition d'un rhéomètre.....	14
I.4.2- domaine d'application des rhéomètres.....	14
I.4.3- Rhéomètre à régime permanent.....	15
I.4.3.1- Rhéomètres de type de couette.....	15
I.4.3.1.1-Rhéomètre à plan de translation.....	15
I.4.3.1.2-Rhéomètre rotatif cylindrique.....	15

Sommaire

I.4.3.1.3- Rhéomètre rotatif à cône /plateau.....	17
I.4.3.2-Rhéomètre à type de poiseuille.....	17
I.4.3.3-Viscosimètre à chute de bille.....	17
I.4.4-Rhéomètre à régime transitoire.....	18
I.4.5-Rhéomètre dynamique (oscillant).....	18
I.5-Lois rhéologiques des suspensions.....	19
I.5.1-Présentation.....	19
I.5.2-Loi d'Einstein.....	19
I.5.3-Loi des suspensions concentrées.....	19

Chapitre II : Généralité sur les nano fluides

II.1-Définition	21
II.2-Types des nano-fluides	22
II.3-Préparation des nano-fluides	23
II.4- Les applications des nano-fluides	24
II.4.1-Refroidissement des systèmes électroniques	25
II.4.2- Refroidissement des systèmes thermiques	25
II.4.3- Refroidissement des systèmes militaires	25
II.4.4- Refroidissement des systèmes spatiaux.....	25
II.4.6-La biomédecine.....	26
II.5-Propriétés thermo-physiques des nano-fluides	26
II.5.1-La fraction volumique(\emptyset).....	26
II.5.2-viscosité dynamique(μ).....	27
II.5.3-Masse volumique(ρ).....	28
II.5.4-La conductivité thermique(K).....	28
II.5.5-La chaleur spécifique(C_p).....	30
II.6-Inconvénients des nano- fluides	31
II.7-Avantages des nano-fluides	31

Chapitre III : Etude Expérimentale

III.1-Introduction	32
III.2- Présentation des nanoparticules d'oxyde de zinc	32
III.3- présentation de fluide de base « l'huile de SAE 10W40 »	34

III.4- préparation des échantillons	35
III.5- Déroulement des essais	37
III.5.1-Présentation du dispositif expérimental et mode opératoire.....	37
III.5.1.2-Description du MCR 302.....	37
III.5.1.3-Mode de fonctionnement.....	39
III.5.1.4-raccordement d'un bain de circulation.....	39
III.5.1.5-Montage de système de mesure.....	40
III.5.1.6-Raccordement au PC.....	40
III.5.1.6.1-Sélectionnerent des paramètres de communication.....	41
III.5.1.7-utilisation du MCR.....	41
III.5.1.7.1- Mise sous tension de l'instrument.....	41
III.5.1.7.2-Panneau de commande MCR.....	42
III.5.1.7.3-Exécution d'une mesure.....	43
III.5.1.8-Démarrage et initialisation du Rhéomètre MCR302.....	43
III.5.1.9-chargement de l'échantillon.....	46

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1- Introduction	48
IV.2 -Comportement rhéologique du nano lubrifiant ZnO/SAE10w40	48
IV.3-Analyse des résultats	59

Conclusion générale

Bibliographie

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Valeurs de viscosité de fluides (à 20°C et à la pression atmosphérique normale).....	6
Tableau (II.1) : combinaisons nanoparticules/fluides de base.....	24
Tableau(III.1) : caractéristiques des nanoparticules du monoxyde de zinc (ZnO).....	34
Tableau (III.2) : caractéristiques de l'huile SAE10w40.....	35
Tableau (III.3) : Masse de nanoparticule monoxyde du Zinc (ZnO).....	36
Tableau (III.4) : composition de l'écran MCR 302.....	43
Tableau(IV.1) : tableau représente les valeurs de viscosité dynamique en fonction de température pour différentes valeurs de fraction volumique solide pour ZnO.....	54
Tableau (IV.2) : tableau représente les valeurs de viscosité dynamique en fonction de la fraction volumique solide pour une température de 60°C.....	55
Tableau (IV.3) : indice de comportement « n » du ZnO/SAE10W40.....	58
Tableau (IV.4) : indice de consistance « K » du ZnO/SAE10W40.....	59

Liste des figures

Figure (I.1) : schéma de principe de cisaillement.....	3
Figure (I.2) : l'écoulement de cisaillement entre deux plans parallèles.....	3
Figure (I.3) : Expérience de la plaque mobile.....	5
Figure(I.4) : rhéogramme des fluides newtoniens $\dot{\gamma} = f(\tau)$	7
Figure (I.5) : rhéogramme d'un fluide rhéofluidifiant(en bleu).....	8
Figure(I.6) : comportement d'un fluide rhéoépaississant(en rouge).....	9
Figure(I.7) : comportement d'un fluide Bingham.....	10
Figure(I.8) : comportement d'un fluide de casson.....	11
Figure(I.9) : Rhéogramme d'un fluide de Herchel-Bukley.....	11
Figure(I.10) :Rhéogramme d'un fluide non newtonien dépendant du temps.....	12
Figure(I.11) : le ketchup aux tomates est un exemple classique d'un matériau thixotrope.....	13
Figure(I.12) : fluide anti-thixotropique : (a) au repos, (b) Après une forte agitation	13
Figure (I.13) : Relaxation d'un corps viscoélastique	14
Figure(I.14) : Rhéomètres plan de translation.....	15
Figure(I.15) : Rhéomètre rotatif.....	16
Figure(I.16) : Rhéomètre cylindrique	16
Figure(I.17) : Rhéomètre rotatif à cône/plan.....	17
Figure (I.18) : Schéma d'un rhéomètre rotatif à cône plateau.....	17
Figure(I.19) : viscosimètre à chute de bille.....	18
Figure (II.1) : Nanofluids vus au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre.....	22
Figure (II.2) : (a) Nanotubes de carbone, (b) Nanoparticules sphérique.....	22
Figure (II.3) : procédé de préparation d'un nano fluide en une étape.....	23
Figure (II.4) : processus de préparation d'un nano fluide en deux étapes.....	24
Figure (III.1) : laboratoire de FIMA.....	33
Figure (III.2) : photo de l'emballage du monoxyde du zinc(ZnO).....	34
Figure (III.3) : les nanoparticules de ZnO.....	34
Figure (III.4) : photo de l'emballage commercial de l'huile SAE10w40.....	35
Figure(III.5) : Homogénéisateur à ultrason.....	37
Figure(III.6) : un agitateur magnétique.....	37
Figure(III.7) : Photographie des échantillons du nano-lubrifiant (l'huileSAE10w40et le ZnO).....	38
Figure (III.8) : Rhéomètre modulaire compact 302 « MCR ».....	39

Liste des figures

Figure(III.9): MCR en vue d'ensemble.....	39
Figure(III.10): Bain de circulation d'un MCR.....	40
Figure(III.11): système de mesure monté (coté gauche).....	41
Figure(III.12): un écran du rhéomètre(MCR).....	43
Figure(III.13): panneau de commande du rhéomètre MCR 302.....	44
Figure (III.14) : lancement du logiciel MCR.....	45
Figure (III.15) : compresseur lié à un MCR302.....	45
Figure(III.16): Exploitation du logiciel dans le réglage du MCR.....	46
Figure(III.17) : choix de type de test pour la mesure.....	46
Figure(III.18): échantillon mis en place du MCR.....	47
Figure(III.19): un MCR302 mis en marche.....	48
Figure (IV.1): rhéogrammes de ZnO/SAE10w40 à différentes températures pour une fraction volumique de 0.1%.....	49
Figure(IV.2): rhéogrammes de ZnO/SAE10w40 à différentes températures pour une fraction volumique de 0.25%.....	49
Figure(IV.3): rhéogrammes de ZnO/SAE10w40 à différentes températures pour une fraction volumique de 0.50%.....	50
Figure(IV.4): rhéogrammes de ZnO/SAE10w40 à différentes températures pour une fraction volumique de 0.75%.....	50
Figure(IV.5): rhéogrammes de ZnO/SAE10w40 à différentes températures pour une fraction volumique de 1%.....	51
Figure(IV.6): rhéogrammes montrent la variation de η la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 0.1%.....	51
Figure(IV.7): rhéogrammes montrent la variation de η la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 0.25%.....	52
Figure(IV.8): rhéogrammes montrent la variation de η la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 0.50%.....	52
Figure(IV.9): rhéogrammes montrent la variation de η la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 0.75%.....	53
Figure(IV.10): rhéogrammes montrent la variation de η la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 1%.....	53
Figure(IV.11) : Courbe viscosité dynamique-températures à différentes fractions volumiques.....	54

Liste des figures

Figure(IV.12) : Courbe de viscosité dynamique-fraction volumique à différentes à 60°C pour le ZnO/SAE10W40.....	55
Figure (IV.13) : diagrammes logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du Taux de cisaillement à différente températures pour une fraction volumique de 0.1%.....	56
Figure (IV.14) : diagrammes logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement à différente températures pour une fraction volumique de 0.25%.....	56
Figure (IV.15) : diagrammes logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement à différente températures pour une fraction volumique de 0.50%.....	57
Figure (IV.16) : diagrammes logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement à différente températures pour une fraction volumique de 0.75%.....	57
Figure (IV.17) : diagrammes logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement à différente températures pour une fraction volumique de 1%.....	58

Nomenclature

Notions associées à l'alphabet romain

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>unité</i>
C_p	chaleur spécifique	[J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]
E	module d'élasticité	[MPa]
k_{bf}	conductivité thermique du fluide de base	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
k_{nf}	conductivité thermique du nano-fluide	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
k_p	conductivité thermique des particules	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
m_f	Masse de fluide	[Kg]
m_p	Masse des particules	[Kg]
n	facteur de forme empirique	-
T	température	[°C]
v_s	volume du solide (nanoparticules)	[m ³]
v_f	volume de fluide de base	[m ³]

Notions associées à l'alphabet grec

$\dot{\gamma}$	la déformation	-
μ	la viscosité dynamique du fluide	[Pa.s]
μ_{nf}	la viscosité de la suspension	[Pa.s]
ν	la viscosité cinématique	[m ² /S]
ρ_f	la masse volumique du fluide	[Kg/m ³]
ρ_{nf}	la masse volumique du nano-fluide	[Kg/m ³]
ρ_s	la masse volumique du solide	[Kg/m ³]
ρ_p	la masse volumique des nanoparticules	[Kg/m ³]
τ	la contrainte de cisaillement	[Pa]
\emptyset	la fraction volumique	-
φ	concentration en volume des particules	-
Ψ	la sphéricité des particules	-

Indice et exposants

NTC	Nanotube de carbone
K	indice de consistance
N	indice de loi de puissance

Introduction générale

Introduction Générale :

Les nanoparticules représentent aujourd'hui un enjeu technologique et économique majeur, elles permettent des innovations très prometteuses dans des nombreux domaines fondamentaux comme : la santé, l'énergie et l'industrie.

Les huiles lubrifiantes sont des liquides visqueux utilisés pour la lubrification des parties mobiles des moteurs et des machines. Elles 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 durée de vie plus longue des machines. Pour faire une sélection appropriée d'un lubrifiant, il est nécessaire de connaître ses propriétés. Parmi les propriétés on cite: la viscosité, la densité, la compressibilité...etc. la propriété la plus importante c'est la viscosité, la relation entre la viscosité et la température, la viscosité et le Taux de cisaillement et aussi importante pour la rhéologie du lubrifiant.

Pour améliorer la performance d'une huile lubrifiante, les chercheurs ont ajouté des nanoparticules à une huile de base pour obtenir un nano lubrifiant avec des caractéristiques rhéologiques différentes.

Notre travail a été réalisé dans le cadre de projet de fin d'étude, à but d'étudier expérimentalement les caractéristiques rhéologiques du ZnO/SAE10W40.

L'influence du Taux de cisaillement, de la fraction volumique et de la température sur la viscosité dynamique du ZnO/SAE10W40 est examinée à partir des essais expérimentaux réalisés sur un rhéomètre MCR302.

Ce mémoire contient deux parties : une 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, on a présenté aussi les types des rhéomètres.

Chapitre II : on a présenté une généralité sur les nano-fluides : types et applications ainsi que les propriétés thermo-physiques des nano-fluides.

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

Chapitre III: on a cité les caractérisations des ZnO/SAE10W40 et on a fait une description détaillée sur la préparation des échantillons et sur le déroulement d'essais.

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

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

Partie bibliographique

I.1- Introduction :

La rhéologie vient du grec ancien : ῥέω / rhéō, « couler » et λόγος / lógos, « étude » 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'objectif 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 continue 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, telles la résistance des matériaux et 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^e siècle (l'élasticité, la plasticité, la mécanique des fluides). 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 [1].

Il est possible de classer les matériaux de leur comportement, il existe :

- ✓ Des corps très déformables ou fluides qui prennent une déformation finie sous l'effet d'une pression hydrostatique, et un écoulement indéfini sous l'effet d'une contrainte de cisaillement même faible.
- ✓ Des corps peu déformables ou solides qui ont une déformation finie quelle que soit la nature de la contrainte, au moins jusqu'à un certain seuil de contrainte.
- ✓ Des matériaux (les plus courants) qui sont compris entre ces deux extrêmes (les matériaux à comportement élastique, plastique, visqueux, viscoplastique,...).

Les méthodes (procédés) de préparation des produits (pâtes, solutions..) ou de la mise en forme des pièces (en métallurgie, en plasturgie..) ou de mouvement des fluides (huiles, pétrole..) nécessitent un écoulement de la matière. Donc il est nécessaire de bien connaître le comportement de cette matière pour déterminer les forces à mettre en jeu.

La rhéologie se divise en plusieurs sortes d'études :

- ✓ Rhéologie expérimentale : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contrainte et déformation ou vitesse de déformation).
- ✓ Rhéologie structurale : explication du comportement à partir de la structure de matériau.
- ✓ Rhéologie théorique : fournir des modèles mathématiques en nombre limités des comportements indépendamment de la structure microscopique [2].

1.2- Grandeurs Rhéologique :

Pour définir les grandeurs principales rhéologiques, on admettant que l'écoulement est laminaire d'un fluide entre deux parois, dont l'une est stationnaire et l'autre se déplace à une vitesse constante.

Les trois grandeurs qui permettent de déformer le fluide sont :

- ❖ La contrainte de cisaillement notée généralement τ exprimée en (N/m²). (Pa).
- ❖ La déformation et la vitesse de cisaillement est noté en générale $\dot{\gamma}$ et exprimé en (S⁻¹).
- ❖ La viscosité dynamique μ exprimée en (Pa.S) [2].

1.2.1 - la contrainte de cisaillement :

La contrainte de cisaillement τ est une grandeur fondamentale en rhéologie, aux 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 apparait à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, elles sont appelées les forces de cisaillements. Donc elle est le rapport de ces forces de cisaillements à l'unité de surface, elle est défini par l'équation suivante [2]:

$$\tau = \frac{df}{ds} \tag{I.1}$$

τ : représente une force par unité de surface : elle s'exprime en newton par m² (N/m²) ou bien en Pascal (Pa).

ds : est l'unité de 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 elle est constante en tout point de la même couche.

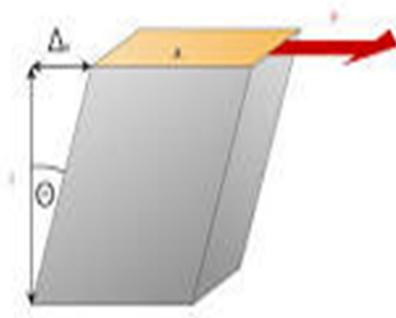


Figure (I.1) : schéma de principe de cisaillement.

1.2.2 - la déformation et la vitesse de cisaillement :

La déformation et la vitesse de cisaillement sont des grandeurs cinématiques fondamentales en rhéologie, 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. (**Figure I.2**)

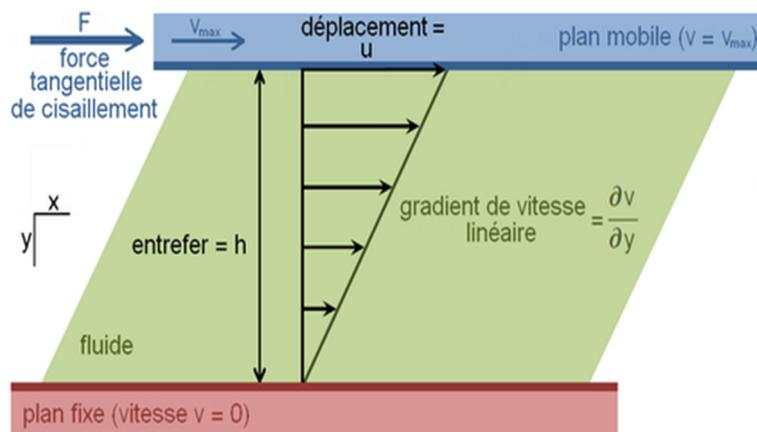


Figure (I.2) : l'écoulement de cisaillement entre deux plans parallèles.

La vitesse de cisaillement caractérise la variation de la vitesse entre les couches limites et elle 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 en inverse de seconde (S^{-1}).

La valeur de la vitesse du cisaillement dépend de façon critique à l'épaisseur z cisailée et non pas seulement de la vitesse de déplacement de la couche mobile. Si l'épaisseur cisailée est faible, on peut atteindre des vitesses de cisaillement très élevées, même avec des vitesses de déplacement relativement faible et l'inverse [3].

L'expression de vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ est donnée par l'équation (I.2), il s'agit de la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dz} \quad (\text{I.2})$$

Soit :

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{I.3})$$

L'expression obtenue relie la contrainte de cisaillement τ au gradient de vitesse $\dot{\gamma}$ (appelée aussi vitesse de cisaillement), et la viscosité de cisaillement η (ou viscosité dynamique). Cette relation est valable si l'écoulement laminaire, c'est-à-dire les couches fluides glissent effectivement les unes sur les autres, sans mouvement désordonné [4].

I.2.3 - La 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 [2]. L'équation donnée par :

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{du}{dx} \quad (\text{I.4})$$

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Où τ est la contrainte appliquée (Pa).

$\dot{\gamma}$ est le gradient de vitesse (S^{-1}).

η est la viscosité dynamique du fluide (Pa.s).

Donc 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 et celle de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. On dit qu'il existe un profil de vitesse [5].

I.2.3.1 - Viscosité dynamique –loi de Newton :

Considérons deux couches contigües distantes dl .

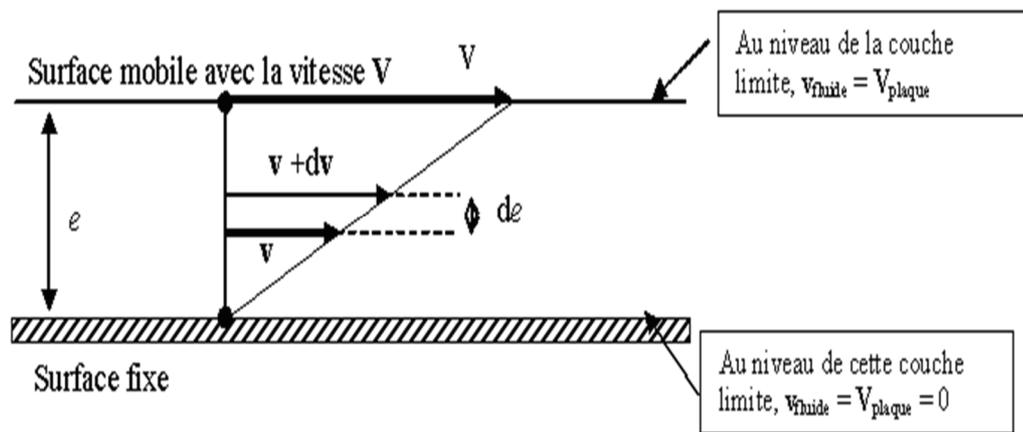


Figure (I.3) : Expérience de la plaque mobile.

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 des vitesses des couches soit dv , à leur surface et inversement proportionnelle à dz [6] :

$$F = -\eta S \frac{dv}{dz} \tag{I.5}$$

Le facteur de proportionnalité η est le coefficient de viscosité dynamique du fluide [3].

I.2.3.2 - Viscosité cinématique :

On définit la viscosité cinématique ν par le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique du fluide.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \tag{I.6}$$

Ou ρ est la masse volumique du fluide (Kg/m^3).

L'unité de la viscosité cinématique est exprimée en (m^2/S) dans le système SI. (Elle peut exprimer par « stoke » (St) dans le système cgs ou $1\text{m}^2/\text{S} = 106 \text{ cSt}$).

Le tableau dessous illustre une comparaison entre les valeurs de viscosité dynamique et cinématique de quelques fluides.

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

Les fluides	La viscosité dynamique (pa.s)	La viscosité cinématique (m^2/s)
Eau	10^{-3}	$1.006 \cdot 10^{-6}$
Air	$18.2 \cdot 10^{-6}$	$15.1 \cdot 10^{-6}$
Glycérine	1.49	$1180 \cdot 10^{-6}$
Benzène	$0.625 \cdot 10^{-3}$	$0.741 \cdot 10^{-6}$
Mercure	$1.55 \cdot 10^{-3}$	$0.116 \cdot 10^{-6}$
CO_2	$14.7 \cdot 10^{-6}$	$8.03 \cdot 10^{-6}$
H_2	$8.83 \cdot 10^{-6}$	10510^{-6}

1.3 - Modèles Rhéologiques :

La rhéologie des fluides à pour but de caractériser des produits par l'expression de relations contraintes-déformation liées à leur propriétés mécaniques. Donc on distingue les fluides newtoniens, les fluides non newtoniens indépendants ou dépendants du temps et les fluides viscoélastiques.

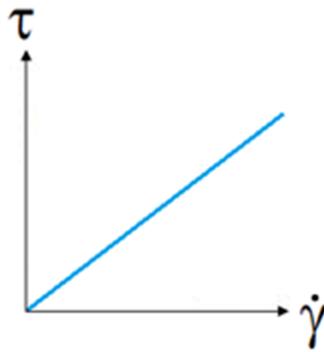
1.3.1 - Fluides newtoniens :

La majorité des fluides rencontrés dans la nature sont newtoniens (l'eau, l'air, les huiles de faibles viscosité...). On dit qu'un fluide est newtonien si le coefficient de viscosité est indépendant du gradient de vitesse et du taux de cisaillement. ces derniers montrent un comportement proportionnels est le coefficient de proportionnalité étant la viscosité dynamique. Ils sont caractérisés par l'équation rhéologique d'état :

$$\tau = \dot{\gamma} \cdot \eta \tag{I.7}$$

Les fluides newtoniens sont caractérisés par des droites de pente $1/\eta$ dans les rhéogrammes

$$\dot{\gamma} = f(\tau)$$



Figure(I.4) : rhéogramme des fluides newtoniens $\dot{\gamma} = f(\tau)$ [14].

1.3.2 - Fluides non newtoniens :

Les fluides non newtoniens sont des fluides complexes comme (les fluides agro-alimentaires, les polymères...etc.). Dans ce cas la viscosité dépend du gradient de vitesse et du taux de cisaillement. Ici la viscosité η n'est pas constante, à chaque valeur du couple ; la vitesse de cisaillement, contrainte de cisaillement ($\dot{\gamma}$, τ) correspond une valeur de la viscosité η . Dès lors on parle de la viscosité apparente (qu'elle caractérise les fluides non newtoniens).

Les fluides non newtoniens sont classés en deux parties :

Fluides non newtoniens indépendants du temps.

Fluides non newtoniens dépendant du temps.

1.3.2.1 - Fluides non newtoniens indépendants du temps :

Ce type de fluide est caractérisé par un comportement indépendant du temps, c'est-à-dire le temps de cisaillement n'influe pas sur leurs comportements, et pour n'importe quelle vitesse de déformation $\dot{\gamma}$

Il y'a une fonction univoque de la contrainte de cisaillement τ .

Ce type de fluide est aussi en trois grandes catégories :

- Fluides rhéofluidifiants ou pseudo plastiques.
- Fluides rhéoépaississants.
- Fluides plastiques.

I.3.2.1.1 - Fluides rhéofluidifiants ou pseudo plastiques :

Ces fluides ont une viscosité qui diminue lorsque le taux de cisaillement augmente (rhéofluidification) ce comportement est s'observe sur les suspensions aqueuses, solutions polymères, le pétrole, certaines peintures...etc.

Le modèle de Waele et Ostwald a été largement utilisé de façon empirique dans l'industrie, il est donné par [4].

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (I.8)$$

Ou :

K : indice de consistance.

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

Dans le modèle d'Ostwald, la viscosité donnée par :

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (I.9)$$

Le cas ou **n=1** correspond au comportement newtonien. Il est judicieux de tracer les rhéogrammes en coordonnées **log-log**. Ou la pente de la droite donne l'exposant **n** et l'ordonnée à l'origine la constante **K**.

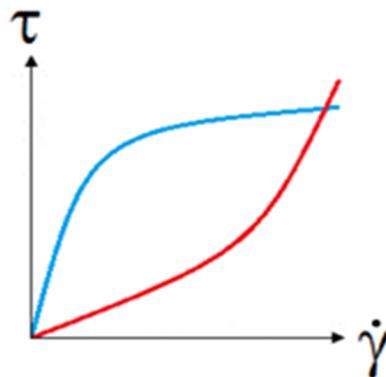


Figure (I.5) : rhéogramme d'un fluide rhéofluidifiant(en bleu) [15].

I.3.2.1.2 - Fluides rhéoépaississants :

Ce sont des fluides dont leur viscosité apparente augmente avec la contrainte de cisaillement. Un fluide peut être rhéoépaississant pour une certaine gamme de taux de cisaillement et rhéofluidifiant. Parmi les fluides qui ont un comportement rhéoépaississant, on trouve les suspensions à concentration élevée (>50%) et le mélange maïzena/eau.

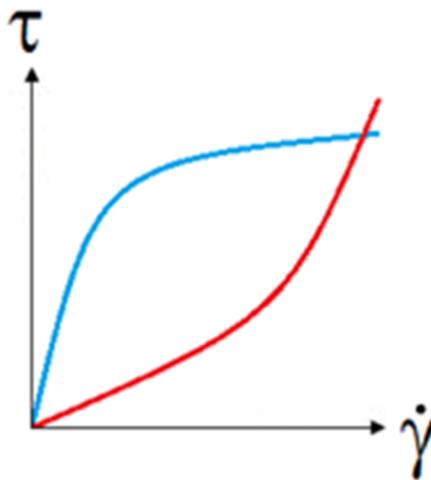
Ce type de fluide est représenté par une équation d'Ostwald ou une loi de puissance :

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

Avec : $n > 1$

Ce type de comportement a été primitivement mis en évidence sur les suspensions de force 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.

Le comportement rhéoépaississant (dilatant) est défini par le rhéogramme ci-dessous :



Figure(I.6) : comportement d'un fluide rhéoépaississant(en rouge) [15].

I.3.2.1.3 : Fluides plastiques :

Ces fluides ne s'écoulent qu'à partir d'une contrainte de cisaillement, dite contrainte seuil τ_c , ce type de fluides se divise en trois autres types :

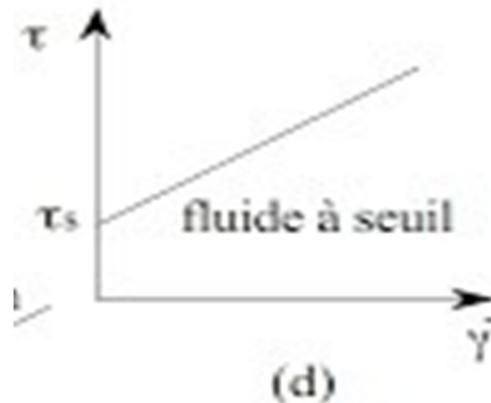
A) Fluides plastiques idéal ou de Bingham :

La courbe d'écoulement est caractérisée par un taux de déformation linéaire de la contrainte lorsque cette contrainte dépasse un seuil τ_c on peut alors obtenir l'équation rhéologique d'état qui est celle d'un liquide Bingham [3].

$$\tau - \tau_c = \eta_p \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{II.11})$$

Avec : η_p est la viscosité plastique.

Le liquide de Bingham a une propriété qui est celle d'un corps qu'il ne présente pas une déformation permanente pour des contraintes plus faibles. 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 τ [6].



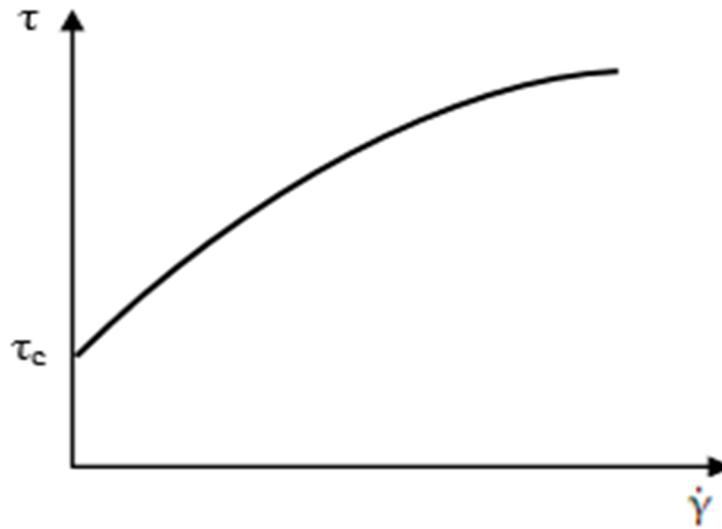
Figure(I.7) : comportement d'un fluide Bingham.

A) Fluide plastique non idéal ou de Casson :

Ce liquide possède également un seuil d'écoulement comme les fluides de Bingham, mais ne présente pas un comportement newtonien, leur fluage est décrit par l'équation suivante [15] :

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\eta \cdot \dot{\gamma}} \quad (\text{I.12})$$

La viscosité η_p et la contrainte critique de seuil τ_c peuvent être déterminé directement d'après le pseudo-rhéogramme en coordonnées bi-logarithmiques [3]:

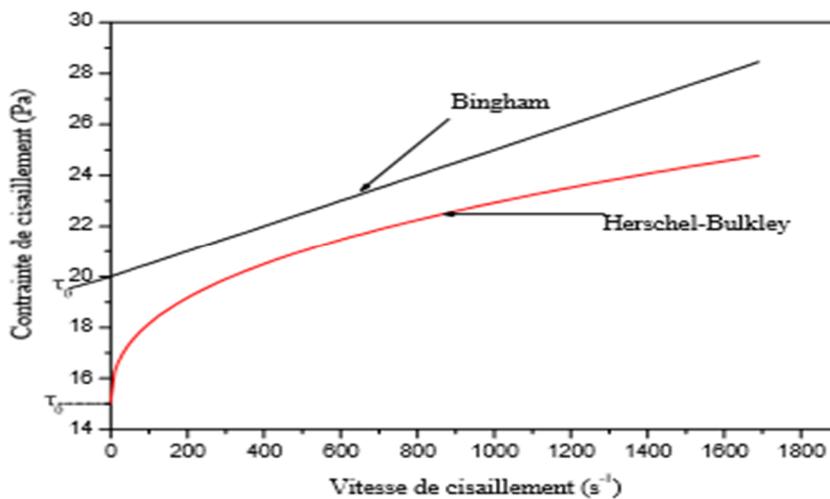


Figure(I.8) : comportement d'un fluide de casson.

B) Fluide de Herchel-Bukley :

Ils sont caractérisés par une contrainte de cisaillement seuil au-dessous de laquelle l'écoulement est impossible. Ces fluides sont compliqués et peuvent être décrits à l'aide de trois paramètres rhéologiques : K , n et τ_c . Ce comportement est représenté par l'équation suivante :

$$\tau = \tau_c + KY^n \tag{II.13}$$



Figure(I.9) : Rhéogramme d'un fluide de Herchel-Bukley.

1.3.2.2 - Fluide non newtoniens dépendants du temps :

Les fluides dont la vitesse de cisaillement dépend de la durée de la contrainte de cisaillement et qui s'établissent parfois après un certain temps de réponse ; ces fluides sont appelés fluides à comportement dépendant du temps.

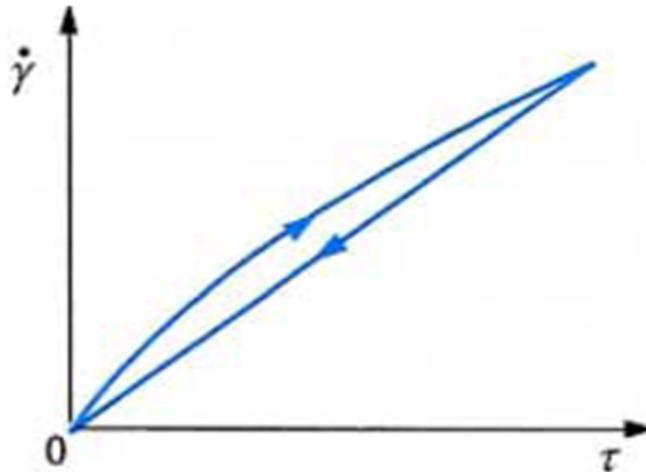


Figure (I.10) : Rhéogramme d'un fluide non newtonien dépendant du temps [4].

On distingue deux catégories dans ce type de fluides :

- Fluides thixotropiques.
- Fluides anti-thixotropiques.

1.3.2.2.1 - Fluides thixotropiques :

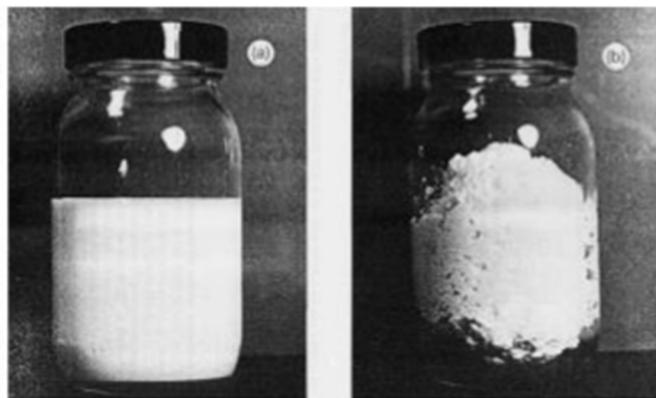
Les fluides thixotropiques ont une viscosité qui diminue avec le temps quand on leur applique une contrainte constante. Après suspension de cette contrainte on ne trouve la viscosité initiale qu'après un certain temps plus ou moins long. C'est un phénomène réversible. Plusieurs matériaux ont un comportement thixotropique tels que : la moutarde, le ketchup, le yaourt....etc. [2].



Figure(I.11) : le ketchup aux tomates est un exemple classique d'un matériau thixotrope.

I.3.2.2.2 : Fluides anti-thixotropiques :

C'est le cas inverse des fluides thixotropiques, les fluides anti-thixotropiques ou rhéopexes: ces fluides sont assez proches des fluides rhéofluidifiants, mais ils ne sont pas à confondre. Un fluide anti thixotrope, sous une contrainte constante, va voir sa viscosité augmenter au cours du temps. Les fluides rhéopexes sont très rares. Cependant, on en utilise un dans notre vie domestique, la crème fouettée. En effet, si vous le secouez, elle va se solidifier mais il va lui falloir un certain temps, et augmenter la vitesse n'y changera rien.



Figure(I.12) : fluide anti-thixotrope : (a) au repos, (b) Après une forte agitation [4].

I.3.3 - Fluides viscoélastiques :

Le fluide viscoélastique est un comportement non-newtonien très important et très fréquent pour plusieurs matériaux, Il possède des propriétés visqueuses et élastiques à la fois.

Le modèle le plus simple de fluide viscoélastique consiste à additionner les contraintes d'origines élastiques et d'origine visqueuses [6] :

$$\tau = \tau_{\text{élast}} + \tau_{\text{visco}} = E \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{II.14})$$

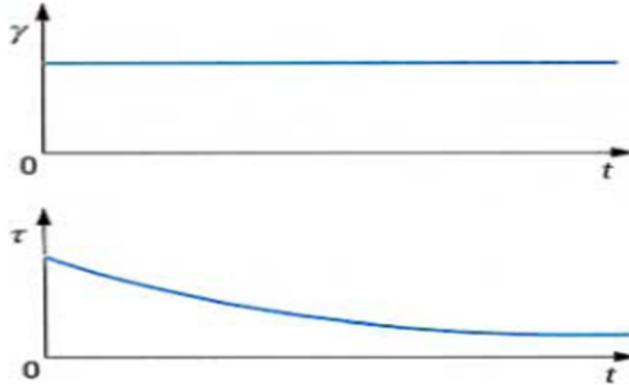


Figure (I.13) : Relaxation d'un corps viscoélastique [4].

I.4 - Les rhéomètres :

I.4.1- Définition d'un rhéomètre :

Les rhéomètres sont des appareils permettant d'obtenir des rhéogrammes qui servent à décrire les propriétés d'écoulement d'un matériau, dans lesquels la substance étudiée est cisailée entre deux surfaces solides.

I.4.2- Domaine d'application des rhéomètres :

Le domaine d'application des rhéomètres est très grand, mais ils sont utilisés surtout dans les domaines de recherches, par exemple la formulation d'adhésifs, d'huiles, de peintures, de cosmétiques ou la réticulation d'une résine thermodurcissable (mesure de la viscosité minimale, du temps de gel...) [].

On peut classer ces rhéomètres en trois catégories :

- Les rhéomètres à régime permanent :
- Les rhéomètres à régime transitoire.
- Les rhéomètres dynamiques qui fonctionnent en régime sinusoïdale forcé [8].

1.4.3 - Rhéomètres à régime permanent :

Sont des appareils utilisés comme des viscosimètres, ils permettant néanmoins d'obtenir des rhéogrammes pour des liquides, ils se divisent en trois types :

- ✓ Rhéomètres de type de couette.
- ✓ Rhéomètres de types de poiseuille.
- ✓ Viscosimètres à chute de bille.

1.4.3.1 - Rhéomètres de type de couette :

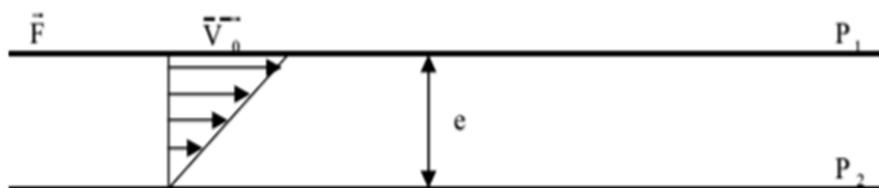
Ils se divisent aussi en trois catégories :

- ❖ Rhéomètres à plan de translation.
- ❖ Rhéomètres rotatifs cylindriques
- ❖ Rhéomètres rotatifs à cône/plateau.

1.4.3.1.1 - Rhéomètres à plan de translation :

A) Principe de fonctionnement :

Dans ces rhéomètres la substance étudiée est insérée entre deux plans parallèles solides et de même surface, une force est appliquée à l'un des plans lui provoque un mouvement de translation de vitesse « V_0 », un mouvement laminaire de cisaillement est engendré, on supposant que la distance « e » entre deux plans est très faible devant les dimensions des plans, la répartition de la vitesse est linéaire et le matériau se décompose en plans parallèles aux surface « P_1 » et « P_2 » [4]



Figure(I.14) : Rhéomètres plan de translation.

1.4.3.1.2 - Rhéomètres rotatifs cylindriques :

Ce dernier est constitué d'un axe de rotation liée à un moteur, qui peut être à vitesse ou à couple imposé, et d'une cellule de mesure. Le fluide est confiné et soumis à un cisaillement

entre les deux surfaces de cellules de mesure, l'une de ces surfaces est mobile en rotation de son axe (le rotor) l'autre est fixe immobile (le stator). Donc on obtient le mouvement laminaire de cisaillement en contact des cylindres qu'une a un mouvement rotatif de vitesse angulaire « ω », l'autre est un cylindre immobile fixe.

A) Principe de fonctionnement d'un rhéomètre cylindrique :

La matière étudiée est placée entre deux cylindres coaxiaux de rayons R_1 et R_2 , qui se décompose en couches cylindriques coaxiales de vitesse angulaire différentes variant de « $\omega=0$ » au niveau de godet à « ω » au niveau de cylindre mobile [6].

On peut déterminer la contrainte de cisaillement τ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ par les équations suivantes [10] :

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{2\Omega}{\left(\frac{d\ln c}{d\ln \Omega}\right)} \quad (\text{II.15})$$

$$\tau(r) = \frac{c}{2\pi r^2 h}$$



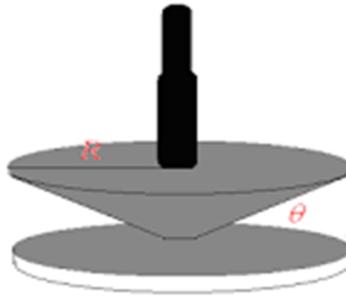
Figure (I.15) : Rhéomètre rotatif [4].



Figure(I.16) : Rhéomètre cylindrique [4].

I.4.3.1.3 - Rhéomètre rotatifs à cône/plateau :

Ce type présente une bonne précision, la matière étudiée est met entre un plan et un cône de rotation de rayon R , dont l'axe du cône est perpendiculaire au plan,



Figure(I.17) : Rhéomètre rotatif à cône/plan.

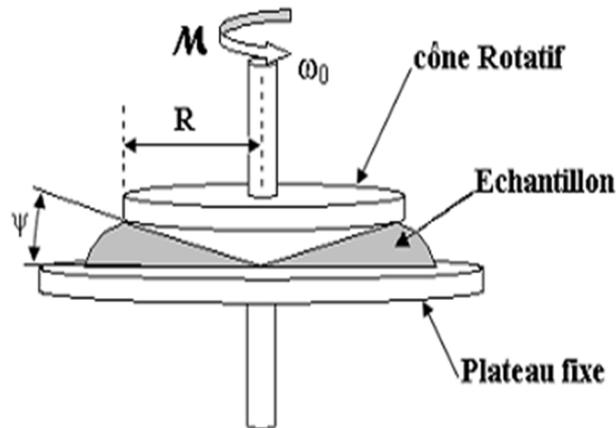


Figure (I.18) : Schéma d'un rhéomètre rotatif à cône plateau [6].

I.4.3.2 - Rhéomètres à type de poiseuille :

Cette catégorie de rhéomètres est simple, elle est utilisée comme des viscosimètres pour mesurer rapidement la viscosité absolue des liquides newtoniens.

Dans cette classe de rhéomètres, le mouvement de cisaillement est engendré en imposant une différence de pression entre les deux extrémités d'un tube cylindrique faible section circulaire, dans lequel est contenue la substance [5].

I.4.3.3 - viscosimètre à chute de bille :

Ce dernier se compose de trois tubes transparents montés sur un support métallique, Au sommet de chaque tube un lâcher automatique assure un bon centrage de la bille, et à la base un dispositif à double vanne pour faciliter la récupération des billes. Derrière les tubes, un

panneau lumineux gradué permet un bon repérage de la bille et une mesure précise de la hauteur de chute. Un chronomètre est livré avec l'appareil [6,4].



Figure(I.19): viscosimètre à chute de bille.

1.4.4 - Rhéomètre à régime transitoire :

Dans ces derniers on soumet la substance étudiée à une oscillation instantanée, après on étudie son comportement dans les instants suivantes. Donc ces rhéomètres sont fabriqués et utilisés spécialement pour la détermination du comportement viscoélastique des matériaux linéaires.

Les rhéomètres à régime transitoire sont devisés en deux types :

- Les rhéomètres de fluage.
- Les rhéomètres de relaxation.

1.4.5 - Rhéomètre dynamique (oscillant) :

Dans le cas des rhéomètres dynamiques, les substances étudiées sont soumis à des mouvements laminaires de cisaillement d'amplitude variant sinusoïdale dans le temps [4].

Il existe deux types d'appareils selon le mouvement :

- Les rhéomètres à oscillation forcée qui peuvent fonctionner dans toute une gamme de fréquence ou à une seule fréquence particulière [6].

- Les rhéomètres à oscillation libre qui mesure des faibles viscosités par l'étude de l'amortissement.

1.5 - Lois rhéologiques des suspensions :

1.5.1 - Présentation :

Il existe plusieurs types de suspensions dans le domaine des nano fluides, mais on peut citer deux types :

- ✓ Une suspension diluée.
- ✓ Une suspension concentrée.

La suspension diluée : dans ce type les particules sont éloignés les uns des autres c'est à dire aucune interaction ne vient perturber leurs pivot (trajectoire), elle caractérisée par une faible fraction volumique en espèce solide. La viscosité augmente en fonction de la concentration en élément solide.

La suspension concentrée : dans ce type les particules sont proches les uns des autres, elle caractérise par une concentration volumique qui dépasse 50%.

1.5.2 - 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 [11]. 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 sphère mono dispersée [11, 12, 2] :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\phi) \quad (II.15)$$

Avec : $\phi = \frac{v_s}{v_s + v_f}$ la fraction volumique du solide.

1.5.3 - loi des suspensions concentrées :

Dans le domaine des suspensions concentrées ($\phi > 0.5$), des relations empiriques ou demi empiriques basés en partie sur la relation d'Einstein ont été développées [11]. 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 ϕ_m [2].

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

Equation de Mooney [11] :

$$\mu = \mu_n \exp^{\frac{2.5\phi}{1-\frac{\phi}{\phi_m}}} \quad (\text{I.16})$$

Équation de Krieger-Dougherty [12] :

$$\mu_{nf} = \mu_n \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2.5\phi_m} \quad (\text{I.17})$$

Avec :

μ_{nf} : la viscosité de la suspension nano fluide.

μ_n : la viscosité du milieu.

ϕ : la concentration en volume des particules.

ϕ_m : la capacité maximale d'empilement granulaire.

Equation de Quémada [13] :

$$\mu_{nf} = \mu_n \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2} \quad (\text{I.18})$$

ou: μ_{nf} : la viscosité de la suspension nano fluide.

μ_n : la viscosité du milieu.

ϕ : la concentration en volume des particules.

ϕ_m : la capacité maximale d'empilement granulaire

II- Généralités sur les nano-fluides :

II.1-Définition :

Les nano fluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés. Ce type de solution suscite un grand intérêt depuis la découverte de leurs propriétés thermiques particulières [17].

Le nano particule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1 à 100 nm) [1]. Les nano particules les plus utilisées pour obtenir des nano fluides sont :

Les nanoparticules des oxydes métalliques :

- ✓ L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).
- ✓ L'oxyde de cuivre (CuO).
- ✓ L'oxyde de silicium(SiO_2).
- ✓ L'oxyde de Titanium(TiO_2).

Les nanoparticules métalliques :

- ✓ L'aluminium(Al).
- ✓ Le cuivre (Cu).
- ✓ L'or.
- ✓ L'argent (Ag).

Les nanoparticules non métalliques :

- ✓ -Les nanotubes de carbone (CNT).
- ✓ -Le diamant (C).

Un nano fluide est une solution colloïdale contenant des particules solides de petite tailles désignées sous le terme de « nano particules », en suspension dans un liquide de base dont on veut modifier ou améliorer certaines propriétés, notamment thermiques et rhéologique.

Les solvants les plus utilisés sont :

- L'eau.
- L'éthylène glycol.
- Les huiles.
- Le toluène.
- Les fluides de réfrigérations (R22.R12..).

Le choix des liquides de bases est primordial pour un nano fluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégation, la sélection d'un fluide se fera en fonction de la nature de nano particule.

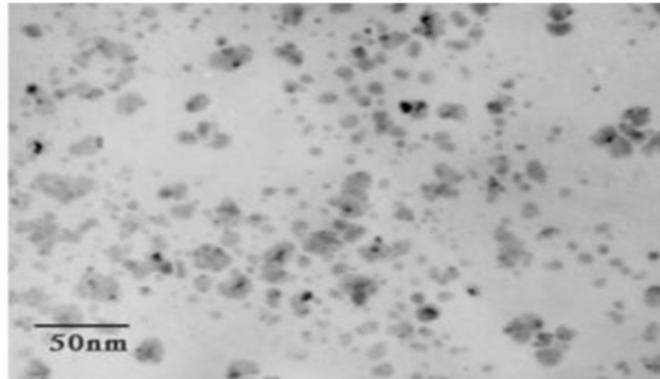


Figure (II.1): Nanofluids vus au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre.

II.2- Types des nano-fluides :

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) constitue un champ de recherche en plein expansion .D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories (figure I.2) :

- Les nano particules sphérique 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, orAu,) ou d'oxyde de cuivre (CuO).
- Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de Titanes TiO_2 , nanotube de silicium... [2].

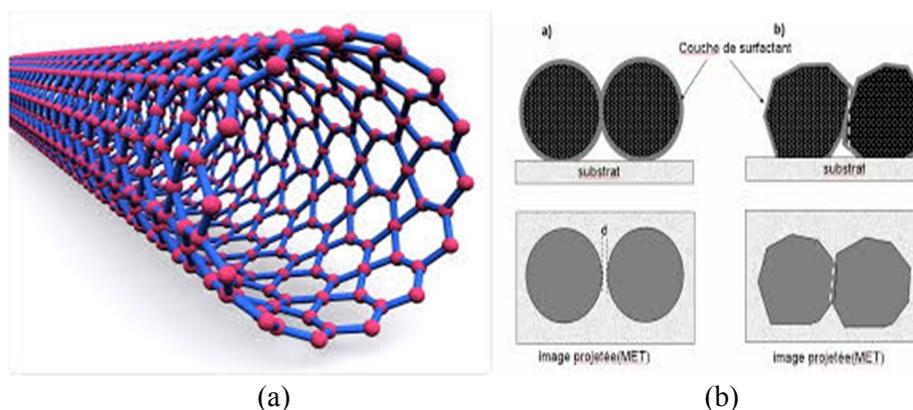


Figure (II.2) : (a) Nanotubes de carbone, (b) Nanoparticules sphérique.

II.3- Préparation des nano fluides :

Il existe plusieurs méthodes pour fabriquer les nanoparticules, on peut les classer en deux procédés :

- ❖ 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 nano fluides :

- **la méthode en une seule étape (one-step-method) :**

Consiste à la dispersion des nanoparticules directement dans le fluide de base. Elle est Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nano fluides mais permet d'éviter l'agglomération et l'oxydation des nanoparticules. (Figure II.2)

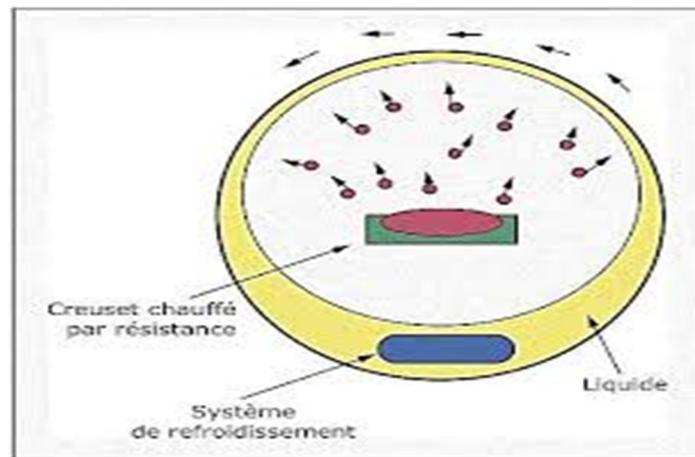


Figure (II.3) : procédé de préparation d'un nano fluide en une étape [2].

- **la méthode en deux étapes (two-step-method) :**

Consiste d'abord à fabriquer 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 agglomérants (figure 1.2).

Ces procédés de fabrication sont de nature chimique ou physique. Ils font l'objet de beaucoup de recherche pour améliorer le coût de production qui reste toutefois élevé. (Variant de 80 dollar pour les 100g de CuO à 535 dollar pour les 25g d'argent par exemple).

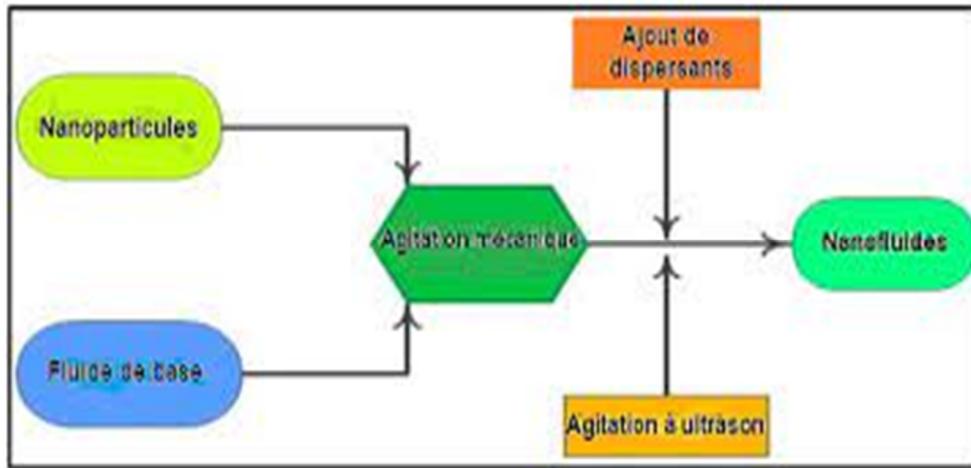


Figure (II.4) : processus de préparation d'un nano fluide en deux étapes [2].

Le tableau (II.1) regroupe une liste de combinaison de nanoparticules et de fluides de bases préparés par différents groupe de recherche

Tableau (II.1) : combinaisons nanoparticules/fluides de base. [18]

	Acétone	Eau	Ethylène glycol	Huile	Toluène	Décène
Ag		X		X		
Au		X			X	
Al ₇₀ O ₃			X			
Al ₂ O ₃		X	X	X		
Bi ₂ Te ₃						
C (diamant)		X				
C (graphite)		X		X		
C(NTC)		X		X		X
C (fullerène)				X	X	
Cu	X	X	X			
CuO		X	X			
Fe			X			
SiC		X				
SiO ₂		X	X			
TiO ₂		X	X			
WO ₃			X			
ZrO ₂		X				

II.4-Les applications des nano-fluides :

Les nano fluides peuvent être utilisés dans nombreux domaines d'application pour améliorer le transfert de chaleur et l'efficacité énergétique, dans cette partie on cite quelques exemples d'applications :

II.4.1 - refroidissement des systèmes électroniques :

Dans les circuits intégrés les nano fluides sont considérés comme fluide de refroidissement pour cela plusieurs études ont été effectuées. **Tsai et Al [19,20]** ont employé un nano fluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un micro-ordinateur.

II.4.2 - Refroidissement des systèmes thermiques :

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules l'addition des nanoparticules dans ces liquides ce dernier améliore le taux de refroidissement. Ce point est étudié par plusieurs groupes de chercheurs, **Tzaneg et Al [19,21]** ont dispersés les nanoparticules de CuO et Al_2O_3 dans l'huile de refroidissement du moteur de transmission. Dans une autre application **Zhang et Al[19,22]** ont rapporté une étude pour réduire la lubrification à l'aide des nanoparticules, et améliorer la résistance à l'usure avec la minimisation du frottement entre les éléments mécaniques mobiles.

II.4.3- Refroidissement des systèmes militaires :

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigées. Ces derniers impliquent des flux thermiques très élevés ($q > 500$ à $1000 W/cm^2$), ou les nano fluides ont montré leur efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaires comme les véhicules militaires les sous marins et les diodes laser à haute puissance.

II.4.4 : Refroidissement des systèmes nucléaires :

L'institut de technologie de Massachussets a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour la nouvelle technologie (nano fluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Actuellement ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nano fluides sur la sûreté neutronique et de la performance économique des systèmes nucléaires.

II.4.5- Refroidissement des systèmes spatiaux :

Pour les applications dans l'espace **You et Al [19,23]** et **Vassallo et Al[19,24]** ont effectué des études pour montrer que la présence des nano particules dans le fluide de refroidissement en électronique générale joue un rôle très important dans les applications de l'espace où la densité de puissance est très élevée.

II.4.6 - La biomédecine :

Les nano fluides et les nanoparticules ont beaucoup d'application en biomédecine par exemple pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles de traitement du cancer, les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues. Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de la région chirurgicale, **Jordan et Al [25]** ont effectué une étude où les nano fluides pourraient être employées pour produire des températures plus élevées autour des tumeurs pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines voisines.

Il existe d'autres applications sachant que dans le domaine des énergies renouvelables les nano fluides sont utilisés pour augmenter le transfert de chaleur à partir des capteurs solaires aux réservoirs de stockage et pour augmenter la densité d'énergie.

II.5- Propriétés thermo-physiques des nano-fluides :

Les propriétés thermo-physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des nanofluides dépendent essentiellement du fluide de base (liquide) et la phase dispersée (nanoparticules) sous forme solide. Ces propriétés sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. C'est-à-dire la définition de ces dernières nécessite un retour aux propriétés de chacun de ses composants (fluide de base et nanoparticule).

II.5.1- La fraction volumique (ϕ) :

La fraction volumique est définie comme étant le volume du composant divisé par la somme des volumes de tous les composants utilisés pour fabriquer ce mélange, elle est un rapport sans dimensions. Elle est la propriété la plus importante pour le nano-fluide, puisque les calculs de toutes autres propriétés sont basés sur la fraction volumique du nano-fluide. On peut définir la fraction volumique totale (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 :

$$\phi = \frac{\text{volumedusolide}}{\text{volumetotaledunano fluide}} = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

V_s = volume du solide (nanoparticules) [m^3].

V_f =volume du fluide de base [m^3].

II.5.2- Viscosité dynamique (μ) :

La viscosité peut être définie comme étant une propriété d'un fluide pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement. Sa connaissance est fondamentale pour toutes les applications impliquant le transport des fluides. L'ajout des nanoparticules a un effet sur la viscosité de ce dernier, la viscosité dynamique obtenue peut influencer énormément par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide de base.

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 nano-fluide est donnée par la relation d'Einstein pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines rigides, la relation est la suivante : [26]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi \quad (\text{II.2})$$

Avec :

μ_{nf} =la viscosité dynamique du nano fluide.

μ_{bf} = la viscosité dynamique du fluide de base.

ϕ =la fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation est valable juste pour $\phi < 0.03$

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 concentration volumique. [27]

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

II.5.3- Masse volumique (ρ) :

La détermination de la masse volumique d'un nano fluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique \emptyset 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 :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (\text{II.4})$$

A partir de l'équation de la fraction volumique (I.1) on déduit alors la masse volumique du nanofluids :

$$\rho_{nf} = (1-\emptyset) \rho_f + \emptyset \rho_s \quad (\text{II.5})$$

Ou :

ρ_{nf} : la masse volumique du nanofluide.

ρ_f : la masse volumique du fluide.

ρ_s : la masse volumique du solide.

II.5.4- la conductivité thermique (K) :

La conductivité thermique ou conductibilité thermique notée λ ou K en (W/m.K), est une propriété importante, elle peut indiquer clairement, la conductivité dépend de la température. Elle est une grandeur physique caractérise 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 K ou 1 C° 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 dérivé un modèle pour estimer la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules.

Le modèle de maxwell est donné par la formule suivante :[28]

$$K_{nf} = \frac{(k_p + 2K_{bf} - 2\phi(k_{bf} - k_p))}{k_p + 2k_{bf} + \phi(k_{bf} - k_p)} K_{bf} \quad (II.6)$$

Ou :

K_{nf} : la conductivité thermique du nanofluide $[W.m^{-1}.K^{-1}]$.

K_{bf} : la conductivité thermique du fluide de base $[W.m^{-1}.K^{-1}]$.

K_p : la conductivité thermique des particules $[W.m^{-1}.K^{-1}]$.

ϕ : la fraction volumique des nanoparticules.

Le modèle de maxwell est satisfaisant pour les suspensions contenant des particules sphérique 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(Ψ). 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. [29]

Dans ce modèle, la conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante : [30]

$$K_{nf} = \frac{(k_p + (n-1)k_{bf} - (n-1)(k_{bf} - k_p)\phi)}{(k_p + (n-1)k_{bf} + (k_{bf} - k_p)\phi)} K_{bf} \quad (II.7)$$

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.

C-Modèle de Yu et Choi :

Une autre expression pour calculer la conductivité thermique a été introduite par Yu et Choi. Ils ont proposé de modéliser les nano fluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique. Cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules. De plus, ils ont supposé que la conductivité thermique de la couche nanométrique est plus grande que la conductivité thermique de liquide. Le modèle de Yu et Choi est donné par la formule suivante [16,29] :

$$K_{nf} = \frac{(k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)(1 + \beta)^3 \phi)}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)(1 + \beta)^3 \phi} k_f \quad (\text{II.8})$$

Avec :

β : est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

D-Modèle de corrélation semi-empirique:

Il y'a plusieurs corrélations semi-empiriques basées sur des résultats expérimentaux utilisées pour calculer la conductivité thermique des différentes nano fluides. [31,29]

$$K_{nf} = (28.905 \phi^2 + 2.8273 \phi + 1) K_f \quad (\text{II.9})$$

L'équation (II.9) est une corrélation empirique utilisée pour estimer la conductivité thermique des nano fluides (EG+AL₂O₃), (Al₂O₃+eau), (Cu+eau) et (huile+nanotube de carbone).

II.5.5- la 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 1K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano fluide, on peut citer les deux modèles suivants :

A-Modèle du Pak et Cho :

Pak et Cho ont utilisé la formule suivante : [31]

$$(C_p)_{nf} = (1 - \phi) (C_p)_{bf} + \phi (C_p)_p \quad (\text{II.10})$$

B-Modèle de Xuan et Roetzel :

Xuan et Roetzel ont travaillé avec la formule ci-dessous : [32]

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi) (\rho C_p)_{bf} + \phi (\rho C_p)_p \quad (\text{II.11})$$

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

II.6 Inconvénients des nano fluides :

Parmi les inconvénients des ces derniers on cite [29] :

- Erosion.
- Viscosité supérieur, chaleur spécifique basse.
- Sédimentation.
- fortes pertes de charge.
- Bouchons dans les écoulements.
- le cout élevé des nanofluides.
- Difficulté dans le processus de production.

II.7 Avantages des nano fluides :

Parmi les avantages des nano fluides on peut citer [2] :

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Minimisation du problème d'érosion et de sédimentation.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.
- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.

Partie expérimentale

III.1- Introduction :

Notre travail a été réalisé sur un rhéomètre MCR 302 dans laboratoire des fluides industriels, Mesures et applications (Fima) à l'université de Djilali Bounaama de Khmis Meliana. Le but principal de cet essai expérimental est d'étudier le comportement rhéologique du nano-lubrifiant ZnO/10w40. Ainsi on a mesuré la viscosité apparente de ce dernier 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 températures varie entre 20°C à 60°C. Dans cette partie, on définit l'huile de base et les nanoparticules utilisées, aussi la procédure de préparation des échantillons du nano lubrifiant, aussi le déroulement d'essai bien détaillé.



Figure (III.1) : laboratoire de FIMA.

III.2 -Présentation des nanoparticules d'oxyde de zinc :

L'oxyde de zinc appelé aussi monoxyde de zinc est un composé chimique de formule ZnO, il est utilisé comme additif dans divers matériaux et produits, il se trouve naturellement comme zincite, c'est une poudre blanche et sa blancheur fait connaitre leur pureté. Cette poudre est soluble dans l'eau et non soluble dans l'alcool, mais il dissout bien dans la plupart des acides.

Il absorbe le dioxyde de carbone de l'air, il a une meilleure absorption dans le spectre UV et il n'est pas un combustible, l'oxyde de zinc n'est pas toxique et stable à la température ambiante, il est utilisé comme un accélérateur pour nombreux produits, ce dernier possède plusieurs propriétés mécaniques et électriques très particulières qui nous permettant d'avoir un large éventail d'applications.

Chapitre III : Etude expérimentale

Les caractéristiques des nanoparticules ZnO sont classées dans le tableau III.1 :

Tableau (III.1) : caractéristiques des nanoparticules du monoxyde de zinc (ZnO).

Caractéristiques	Valeurs
Couleur	<i>blanc solid</i>
Densité	<i>5606Kg/m</i>
Masse molaire	<i>81.14g/mol</i>
Point de fusion	<i>2248K(1975C°)</i>

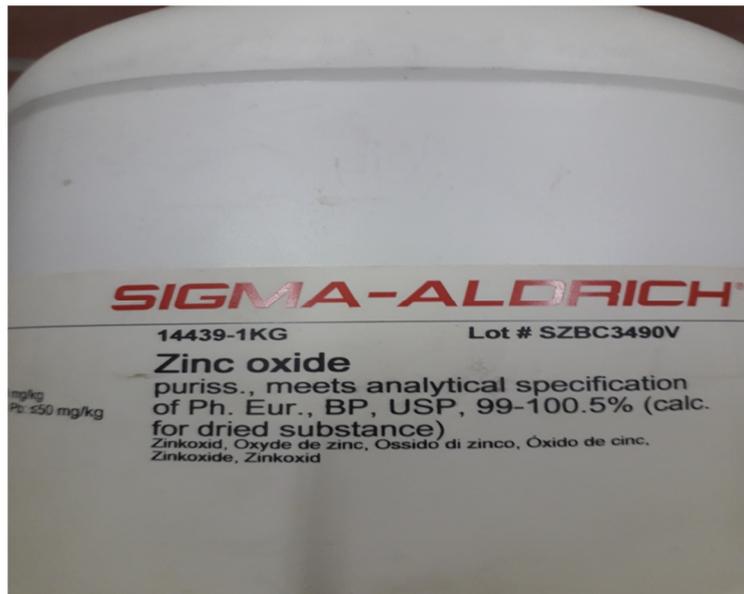
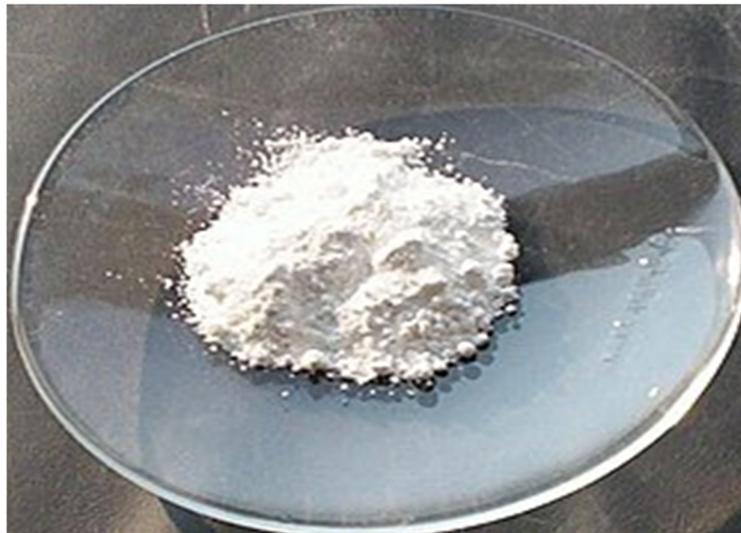


Figure (III.2): photo de l'emballage du monoxyde du zinc(ZnO).



Figure(III.3) : les nanoparticules de ZnO.

III.3-présentation de fluide de base « l'huile de SAE 10W40 » :

L'huile SAE10w40 est une huile de marque CASTROL, fabriquée par British petroleum(BP) en Belgique. C'est une huile de type synthétique, conçues 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 d'un bidon de 5 litres. La vidange se fait tous les 10000 km.

Le tableau (III.2) si dessous montre les caractéristiques de l'huile SAE10w40.

Tableau (III.2) : caractéristiques de l'huile SAE10w40 [33].

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique à 15°C	0.8631g/ml
Viscosité cinématique à 100°C	14.6mm ² /S
Viscosité, CCS-25°C (10w)	6730mPa.S
Viscosité cinématique à40°C	97mm ² /S
Indice de viscosité	156
Point d'écoulement	-33°C
Point d'éclair	202°C
Cendres sulfatées	1.0% <i>m</i>



Figure(III.4): photo de l'emballage commercial de l'huile SAE10w40.

III.4- préparation des échantillons :

Pour la préparation des échantillons du nano lubrifiant, on a utilisé la méthode en deux étapes. On a préparé 5 échantillons avec des fractions volumiques de 0.1%, 0.25%, 0.5%, 0.75% et 1% pour cette raison on a utilisé l'équation (III.1) de la fraction volumique pour déterminer la masse de la nano particule **ZnO** correspondante à chaque fraction volumique avant d'être disperser dans l'huile **SAE 10w40**.

$$\emptyset = \frac{V_p}{V_p + V_f} = \frac{\left(\frac{m}{\rho}\right)_p}{\left(\frac{m}{\rho}\right)_p + \left(\frac{m}{\rho}\right)_f} \quad \text{(III.1)}$$

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

Connaissant le volume de l'huile utilisée $V_f=30\text{ml}$ et la masse volumique de l'huile et des nano particules sont respectivement $\rho_f=0.879\text{g/cm}^3$ et $\rho_p=5.6\text{g/cm}^3$

Les masses des nanoparticules calculées correspondantes à chaque fraction volumique sont classées sur le tableau si dessous :

Tableau (III.3) : Masse de nanoparticule monoxyde du Zinc (ZnO).

Fraction volumique \emptyset	Masse de nanoparticule ZnO
0.1%	0.1681g
0.25%	0.4209g
0.50%	0.8439g
0.75%	1.2692g
1%	1.6965g

Quand on calcule la masse des nanoparticules, cette quantité est pesée à l'aide d'une balance de précision, après on ajoute la quantité pesée à l'huile SAE 10W40.

Ensuite le mélange est agité dans un agitateur magnétique pendant (1h), après on le met dans un homogénéisateur à ultrason pendant (2h) pour obtenir une suspension homogène et uniforme.

On répète à chaque fois cette manipulation pour les Cinq échantillons avec des concentrations de 0.1%, 0.25%, 0.5 %, 0.75% et 1%.



Figure(III.5): Homogénéisateur à ultrason.



Figure(III.6): un agitateur magnétique.



Figure(III.7): Photographie des échantillons du nano-lubrifiant (l'huileSAE10w40et le ZnO).

III.5- Déroulement des essais :

Après l'étape de la préparation des échantillons, on a commencé l'étape des calculs rhéologiques, ces mesures sont réalisés sur un rhéomètre rotatif MCR302, ce dernier est lié et fonctionner par plusieurs accessoires tels que le compresseur à air, le bain de circulation et un ordinateur muni d'un logiciel d'exploitation.

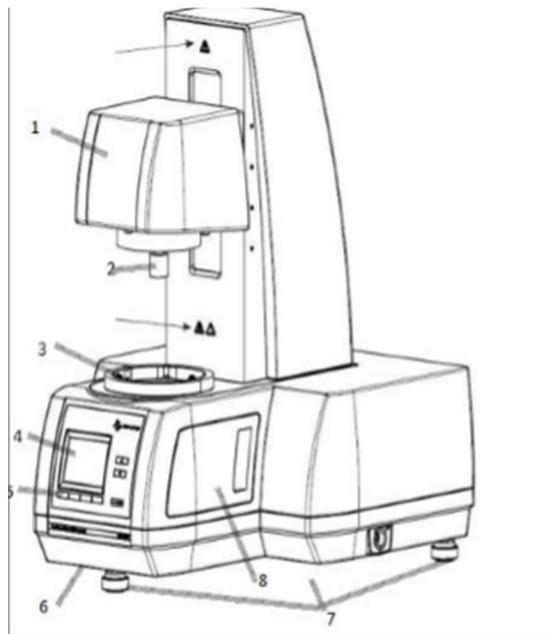
III.5.1-Présentation du dispositif expérimental et mode opératoire:

III.5.1.2-Description du MCR 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 Toolmaster (système de reconnaissance et de configuration automatique), offre une interface utilisateur conviviale. Tous les éléments de commande mécanique et électrique sont incorporés dans une unité unique. La tête de mesure amovible assure un espace suffisant pour le chargement et le réglage de l'échantillon.



Figure (III.8) : Rhéomètre Modular compact 302.



Figure(III.9): 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.

III.5.1.3-Mode de fonctionnement :

Le rhéomètre MCR fonctionne en deux différents modes :

- Mode hors ligne.
- Mode on ligne.

Dans le mode hors ligne, le MCR peut être commandé à l'aide des boutons situés sur le panneau de commande et le voyant vert sur ce dernier est allumé.

Par contre, dans le mode on ligne le MCR commande à distance à l'aide du logiciel installé sur un pc et le voyant vert est allumé. 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.5.1.4-raccordement d'un bain de circulation :

L'utilisation du bain de circulation est très importante pour la régulation de la température dans la cellule de mesure. On a installé un indicateur de débit fourni, pour vérifier si le fluide circule et si le bain fonctionne correctement.



Figure(III.10): Bain de circulation d'un MCR.

III.5.1.5 : Montage de système de mesure :



Figure(III.11): système de mesure monté (coté gauche).

Pour monter le système de mesure on suit les étapes 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.

III.5.1.6-Raccordement au PC :

Pour accorder le MCR avec un PC, il faut installer le logiciel sur PC et pour faire cette étape on insère un CD d'installation et suivre les instructions sur l'écran.

- 1-Mettre l'instrument sous tension et attendre que la procédure de démarrage se termine.
- 2-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.

Chapitre III : Etude expérimentale

3-Lorsque la sélection est effectuée, appuyer sur « enter » et attendre que l'instrument termine l'enregistrement des réglages.

4-Appuyer sur « menu » pour revenir à l'écran par défaut.

5-Appuyer sur « online » pour revenir au mode en ligne.

6-Mettre l'instrument hors tension pour connecter les câbles.

III.5.1.6.1-Selectionnement des paramètres de communication :

1-Mettre l'instrument sous tension et attendre que la procédure de démarrage se termine.

2-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.

3-Lorsque la sélection est effectuée, appuyer sur « enter » et attendre que l'instrument termine l'enregistrement des réglages.

4-Appuyer sur « menu » pour revenir à l'écran par défaut.

5-Appuyer sur « online » pour revenir au mode en ligne.

6-Mettre l'instrument hors tension pour connecter les câbles.

III.5.1.7-Utilisation du MCR :

III.5.1.7.1- Mise sous tension de l'instrument :

Quand on fini le raccordement les câbles et les tuyaux, on met le MCR sous tension à l'aide d'un interrupteur situé sur le coté gauche.



Figure(III.12): un écran du rhéomètre(MCR).

Tableau (III.4) : composition de l'écran MCR 302.

	La ligne supérieure de l'écran affiche la connexion active.
Statuts	ce champ affiche l'état courant du rhéomètre. Lorsqu'il est sélectionné dans le menu, il affiche également la pression en cours pour le palier à air.
Normale force	ce champ affiche la force normale courante agissant sur le palier à air. Lorsque la limite de force normale est dépassée, l'arrière-plan de ce champ devient rouge.
Température	ce champ affiche la température courante du dispositif de température.
Position	ce champ affiche l'entrefer de mesure courant. Cette valeur est calculée à partir de la position de la tête de mesure et dépend du système de mesure monté et du dispositif de température. L'arrière plan de ce champ devient rouge lorsque la position de mesure est en dehors des limites.
Système de mesure	ce champ affiche le nom du système de mesure actuellement monté.

III.5.1.7.2-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.13): panneau de commande du rhéomètre MCR 302.

III.5.1.7.3-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.5.1.8-Démarrage et initialisation du Rhéomètre MCR302 :

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



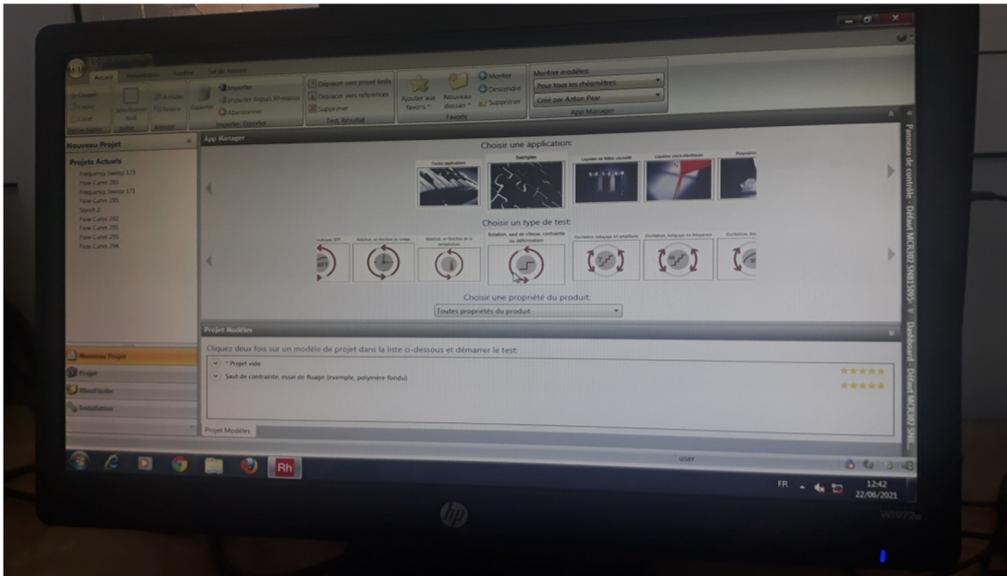
Figure (III.14) : lancement du logiciel raccordé par MCR.



Figure (III.15): compresseur lié à un MCR302.

- 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 entrefer zéro, démarrer la procédure de réglage de l'entrefer zéro et régler la position de mesure une fois cette procédure terminée.

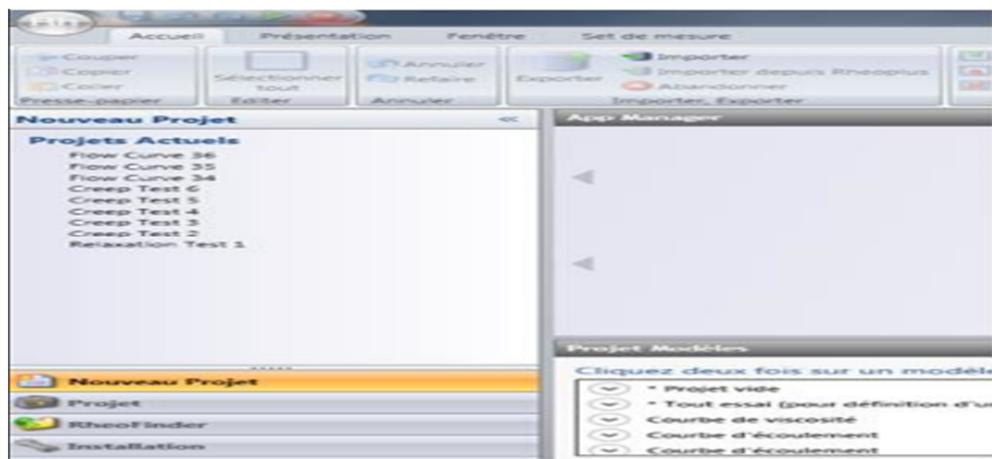
Chapitre III : Etude expérimentale



Figure(III.16): 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.17) : choix de type de test pour la mesure.

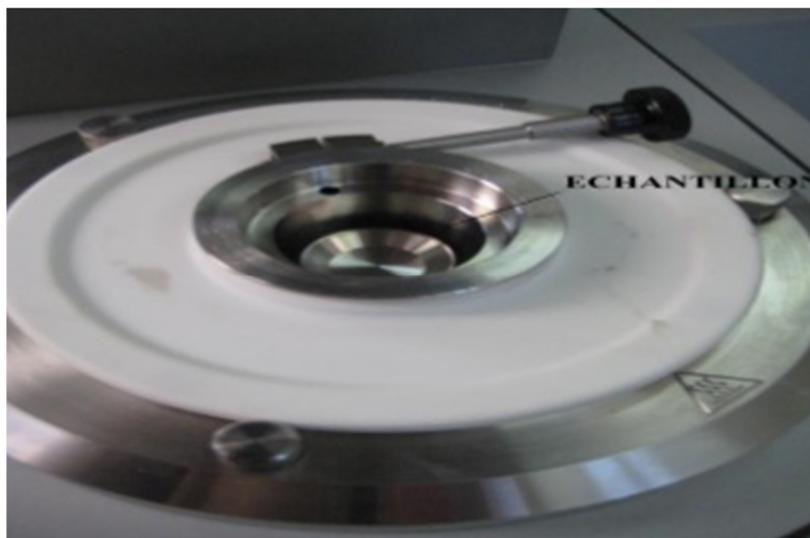
- 2- Initialiser la position de la tête :
- 3- Remonter la tête à 60 mm
- 4- Déplacer la tête de l'instrument vers le haut et charger l'échantillon.
- 5- Déplacer la tête vers la position de réglage (systèmes de mesure plan parallèle et cône- plan), régler l'échantillon, puis déplacer la tête de mesure 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

Chapitre III : Etude expérimentale

- 8- Régler le gap zéro.
- 9- Régler la température.
- 10- Pour l'ajustement du moteur de l'appareil, faite le test Air check une fois chaque trois mois.
- 11- Redescendre la géométrie à l'entrefèr zéro.
- 12- Faite 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.5.1.9-chargeement de l'échantillon :

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



Figure(III.18): échantillon mis en place du MCR.

Chapitre III : Etude expérimentale

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.19): un MCR302 mis en marche.

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

IV.1- Introduction :

Notre travail expérimental a pour objectif d'étudier le comportement rhéologique du nano lubrifiant **ZnO/SAE10W4** en fonction de plusieurs facteurs tels que la température, le taux de cisaillement et la concentration volumique des nanoparticules.

La température choisie varie de 20⁰c à 60⁰c avec un pas de 10⁰c.

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.

Pour identifier le comportement rhéologique des fluides, on utilise la relation de Waele et Ostwald, elle est donnée par :

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

Avec :

K : est l'indice de consistance.

n : est l'indice de comportement (de la loi de puissance).

τ : la contrainte de cisaillement.

On peut définir la viscosité des fluides qui suit la loi de puissance par :

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

η représente la viscosité apparente. Si n est égal à 1 alors le fluide est newtonien, et si ça valeur est différente de 1 donc le fluide est non newtonien.

Afin de tracer les rhéogrammes logarithmiques de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement, on obtient les indices de comportement et de consistance **n** et **k** par l'équation suivante :

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

IV.2 : Comportement rhéologique du nano lubrifiant ZnO/SAE10w40 :

A) Relation « contrainte-Taux de cisaillement » (τ [Pa], $\dot{\gamma}$ [S⁻¹]) :

Les figures (IV.1),(IV.2),(IV.3),(IV.4)et (IV.5) représentent des rhéogrammes illustrent la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement pour les nano lubrifiants ZnO/SAE 10W40 avec un fraction volumique des particules solides de $\phi=0.1\%$, 0.25% , 0.50% , 0.75% et 1% . Avec toutes les températures.

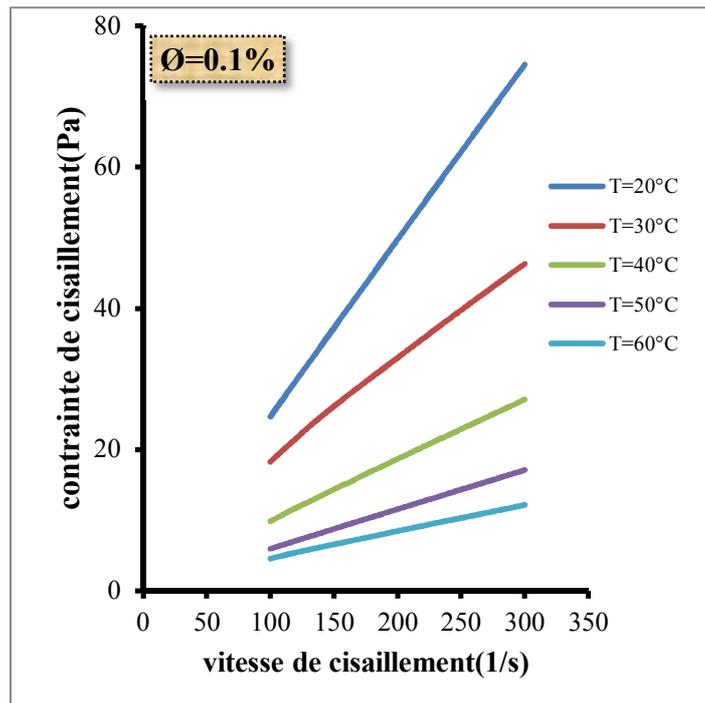
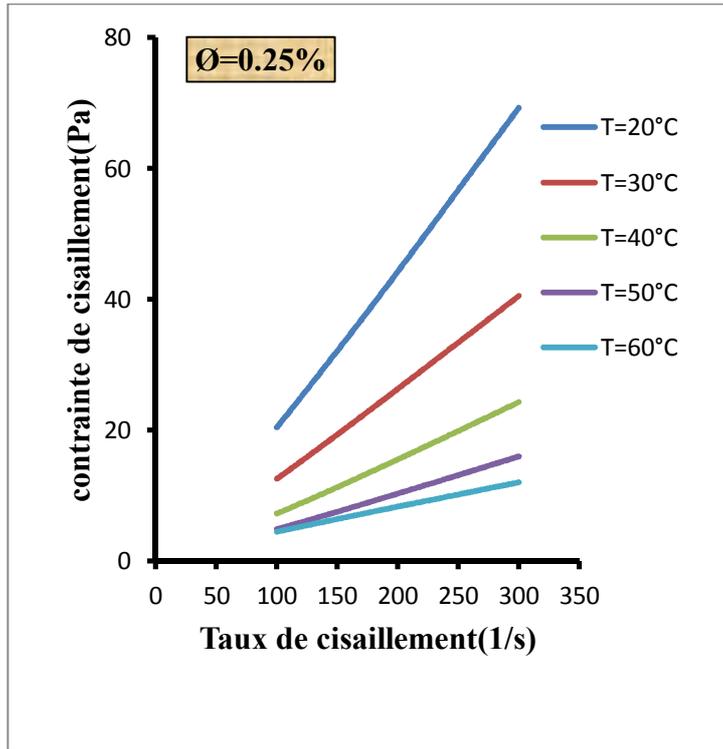
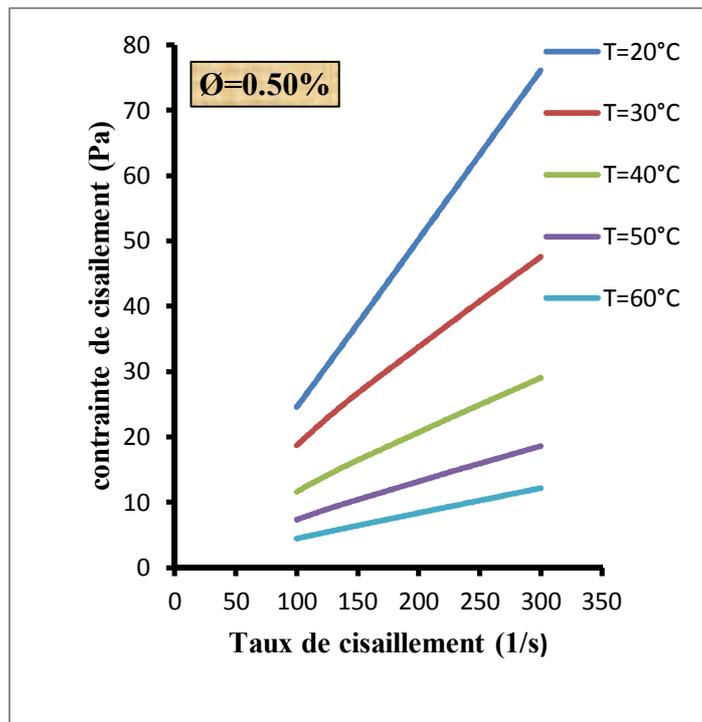


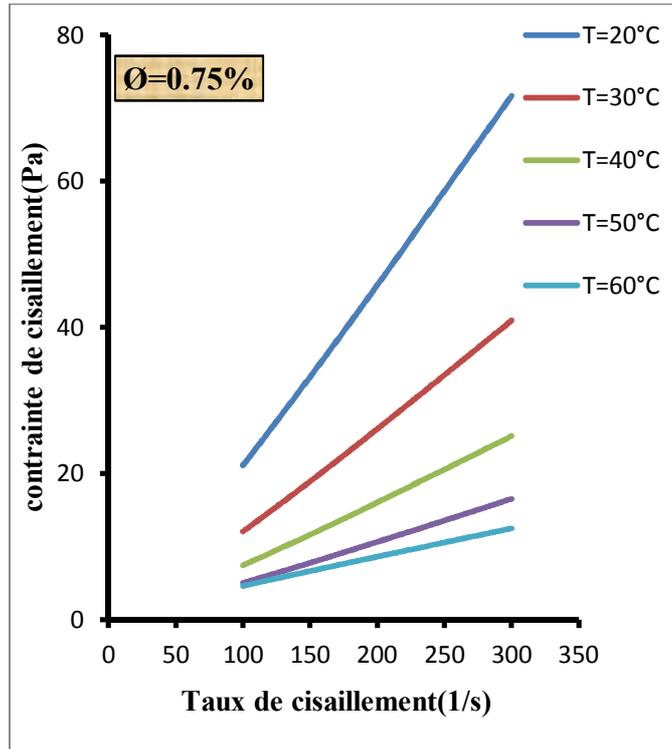
Figure (IV.1): rhéogrammes de ZnO/SAE10w40 à différentes températures pour une fraction volumique de 0.1%.



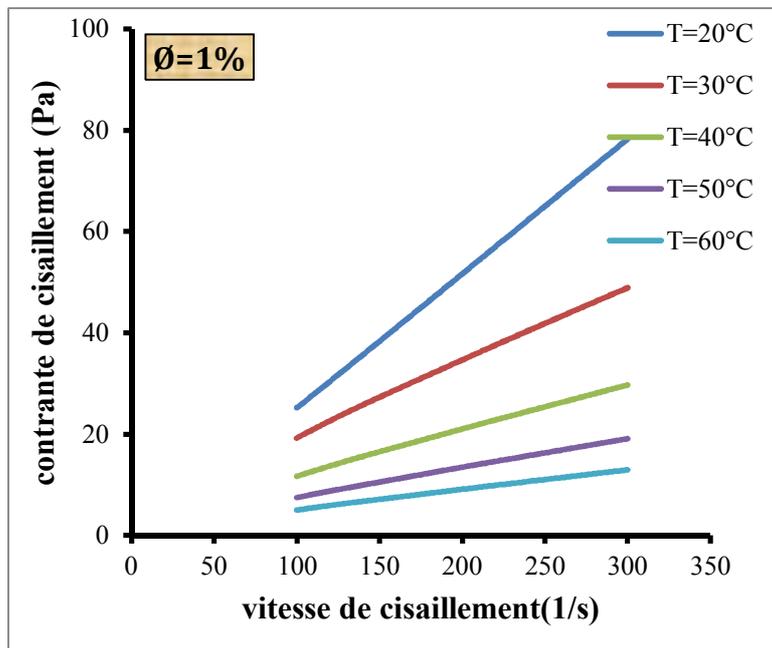
Figure(IV.2): rhéogrammes de ZnO/SAE10w40 à différentes températures pour une fraction volumique de 0.25%.



Figure(IV.3): rhéogrammes de ZnO/SAE10w40 à différentes températures pour une fraction volumique de 0.50%.



Figure(IV.4): rhéogrammes de ZnO/SAE10w40 à différentes températures pour une fraction volumique de 0.75%.



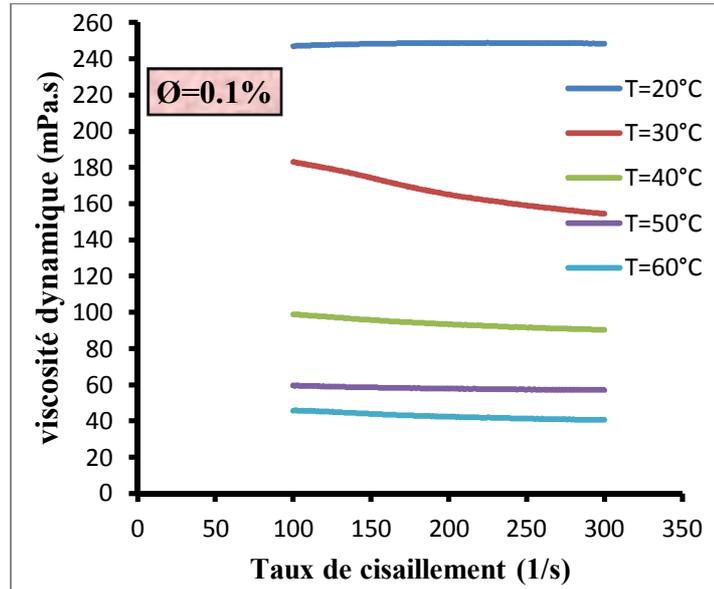
Figure(IV.5): rhéogrammes de ZnO/SAE10w40 à différentes températures pour une fraction volumique de 1%.

B) Relation « viscosité dynamique-vitesse de cisaillement » (η [mPa.S], $\dot{\gamma}$ [S^{-1}]) :

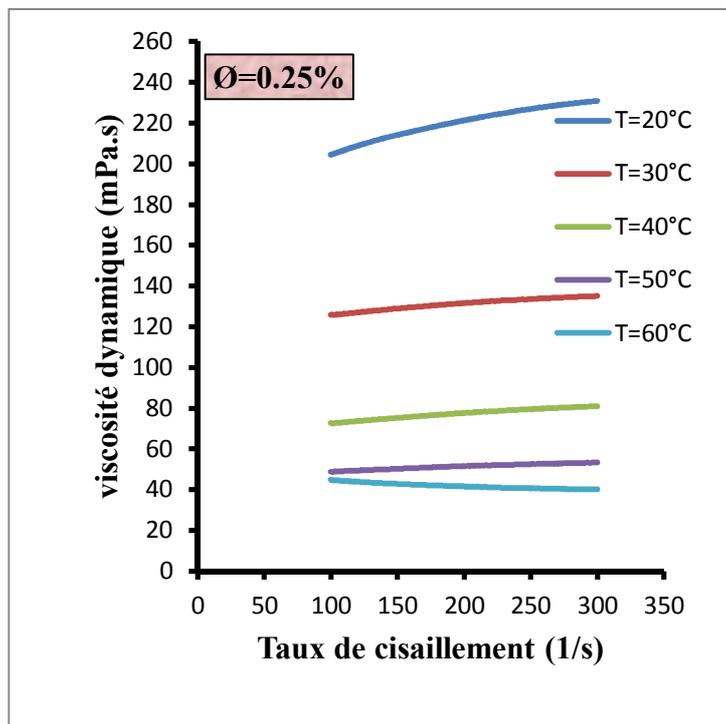
Les figures (IV.6),(IV.7),(IV.8),(IV.9)et (IV.10) représentent des rhéogrammes illustrent la variation de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour les nano

Chapitre IV : Résultats et discussion

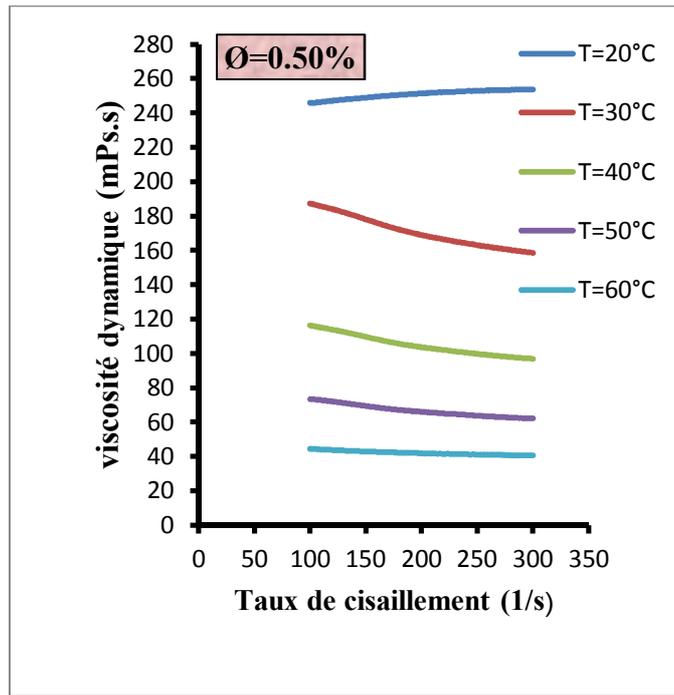
lubrifiants **ZnO/SAE 10W40** avec un fraction volumique des particules solides de $\phi=0.1\%$, 0.25% , 0.50% , 0.75% et 1% .à toutes les températures.



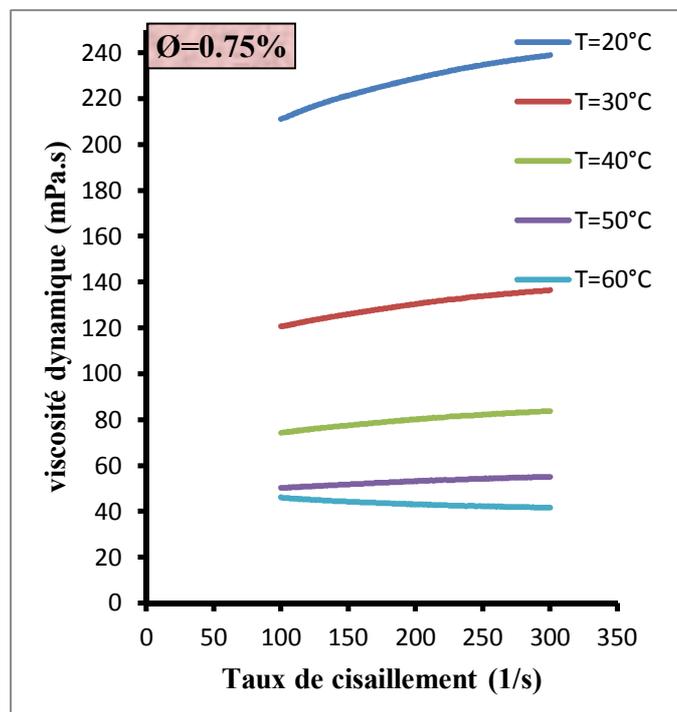
Figure(IV.6): rhéogrammes montrent la variation de t la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 0.1%.



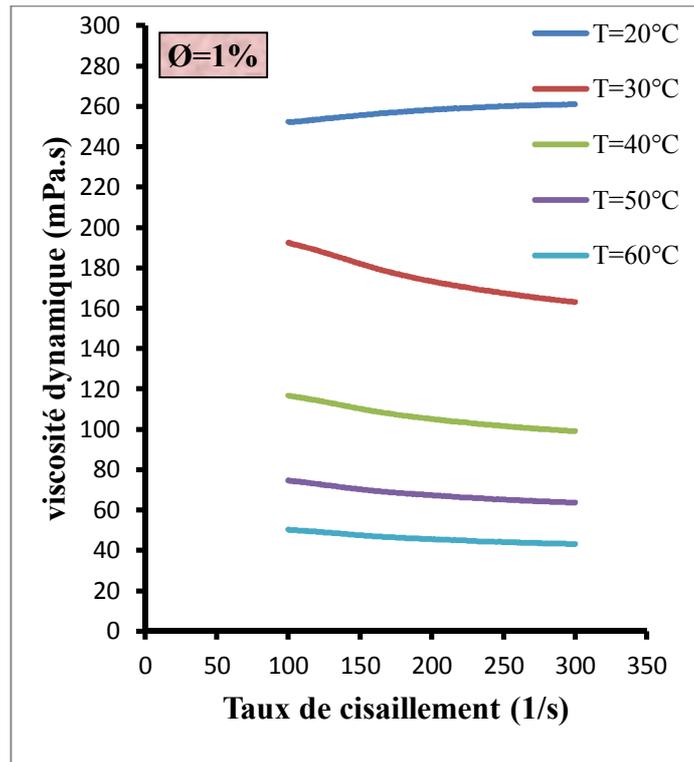
Figure(IV.7): rhéogrammes montrent la variation de t la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 0.25%.



Figure(IV.8): rhéogrammes montrent la variation de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 0.50%.



Figure(IV.9): rhéogrammes montrent la variation de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 0.75%.



Figure(IV.10): rhéogrammes montrent la variation de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique de 1%.

C) Relation viscosité –température à Taux de cisaillement constant :

Le tableau ci-dessous représente le diagramme de la viscosité dynamique en fonction de la température pour un Taux de cisaillement constant tel que $\dot{\gamma} = 100 \text{ S}^{-1}$.

Tableau (IV.1) : tableau représente les valeurs de viscosité dynamique en fonction de température pour différentes valeurs de fraction volumique solide pour ZnO.

T°C	μ [mPa.s] (0.1%)	μ [mPa.S] (0.25%)	μ [mPa.S] (0.50%)	μ [mPa.S] (0.75%)	μ [mPa.S] (1%)
20	247.04	204.6	245.95	211.16	252.41
30	182.96	125.93	187.35	120.67	192.56
40	98.882	72.7	116.31	74.199	116.76
50	59.614	48.84	73.366	50.231	74.643
60	45.675	44.867	44.389	46.114	50.317

في هذه العمل، قمنا بدراسة السلوك الانسيابي لزيت التشحيم النانوي من خلال نهج تجريبي، استعملنا طريقة الخطوتين، يعني قمنا بمزج الجزيئات النانوية في زيت المحرك، مع التركيز الحجمي للجزيئات تقدر ب: 0.1%، 0.25%، 0.50%، 0.75%، 1%، تم قياس اللزوجة في درجات حرارة من 20°C 30°C 40°C 50°C 60°C بمعدلات قص تتراوح من 100 إلى 300 بعد تحليل النتائج، تم الكشف أن زيت ألتشحيم النانوي المدروس هم مائع غير نيوتوني •

سيولة بالقص. كلمات المفتاحية: زيت التشحيم، الانسيابية، اللزوجة، مقياس ريوماتر، السائل النانوي ZnO/SAO10w40

Résumé :

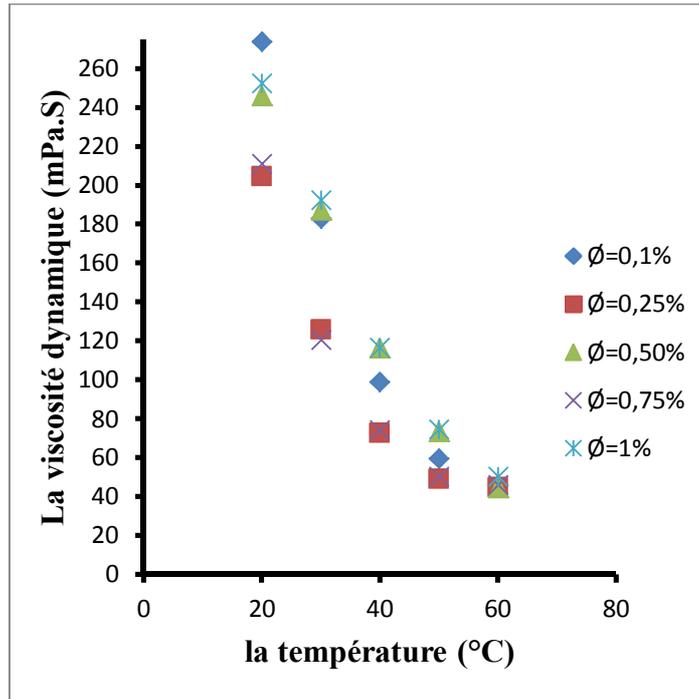
Dans notre travail, on a étudié le comportement rhéologique du nano-lubrifiant ZnO/SAE10w40 par une approche expérimentale. On a utilisé la méthode des deux étapes ,c'est à dire on a dispersé les nanoparticules de ZnO dans l'huile moteur SAE10w40 avec différentes fraction volumiques solides de 0.1% , 0.25%, 0.50%, 0.75% et 1%. la viscosité a été mesuré dans des plages des températures de 20°C 30°C 40°C 50°C et 60°C. Avec un intervalle de Taux de cisaillement de 100 S⁻¹ à 300 S⁻¹. Après l'analyse des résultats, il a été relevé que le nano-lubrifiant étudié est un fluide non newtonien.

Mots clés : Nano-lubrifiant, comportement rhéologique, fluide non newtonien. Viscosité ,rhéometre , nano-fluide ZnO/SAO10w40

Abstract :

In our work, we investigated a rheological behavior of ZnO/SAE10w40 with experimental approach, we used the two steps method, it means nanoparticles were dispersed in SAE10w40 engine oil with different solid volume fractions of 0.1%, 0.25%, 0.50%, 0.75% et 1%. the viscosity was measured in temperature range from 20°C, 30°C, 40°C, 50°C and 60°C. and at shear rates ranging from 100 S⁻¹ to 300 S⁻¹. After analysing the results, it was revealed that the nano-lubricants are non-Newtonian fluids.

Keywords : Nano-lubricants, Rheological behavior, Non-Newtonian fluids.



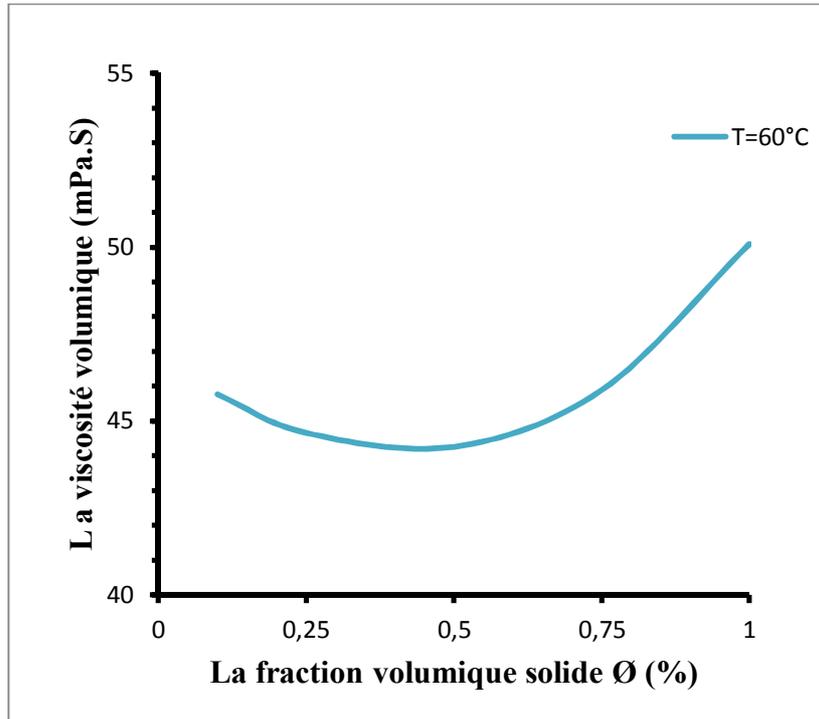
Figure(IV.11) : Courbe viscosité dynamique-températures à différentes fractions volumiques.

D) Relation viscosité –fraction volumique pour un Taux de cisaillement constant :

Le tableau ci-dessous représente le diagramme de la viscosité dynamique en fonction de la fraction volumique solide pour une valeur de températures égale à 60°C, et pour un Taux de cisaillement constant égale à $\dot{\gamma}=100\text{S}^{-1}$.

Tableau (IV.2) : tableau représente les valeurs de viscosité dynamique en fonction de la fraction volumique solide pour une température de 60°C.

$\emptyset(\%)$	μ [mPa.s] (60°C)
0.1	40.565
0.25	40.099
0.50	40.544
0.75	41.597
1	43.163



Figure(IV.12) : Courbe de viscosité dynamique-fraction volumique à différentes à 60°C pour le ZnO/SAE10W40.

E) Relation logarithmique « contrainte de cisaillement-Taux de cisaillement » :

Les figures (IV.13),(IV.14),(IV.15),(IV.16)et(IV.17) montrent le diagrammes logarithmique de contrainte de cisaillement en fonction du Taux de cisaillement à différentes températures pour les échantillons avec des fractions volumique solide de 0.1% , 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1%

Les indices de consistances et de comportements pour chaque fraction et à différentes températures ont été calculés à partir de ces courbes, les indices **n** et **K** sont classés dans les tableaux (IV.3) et(IV.4).

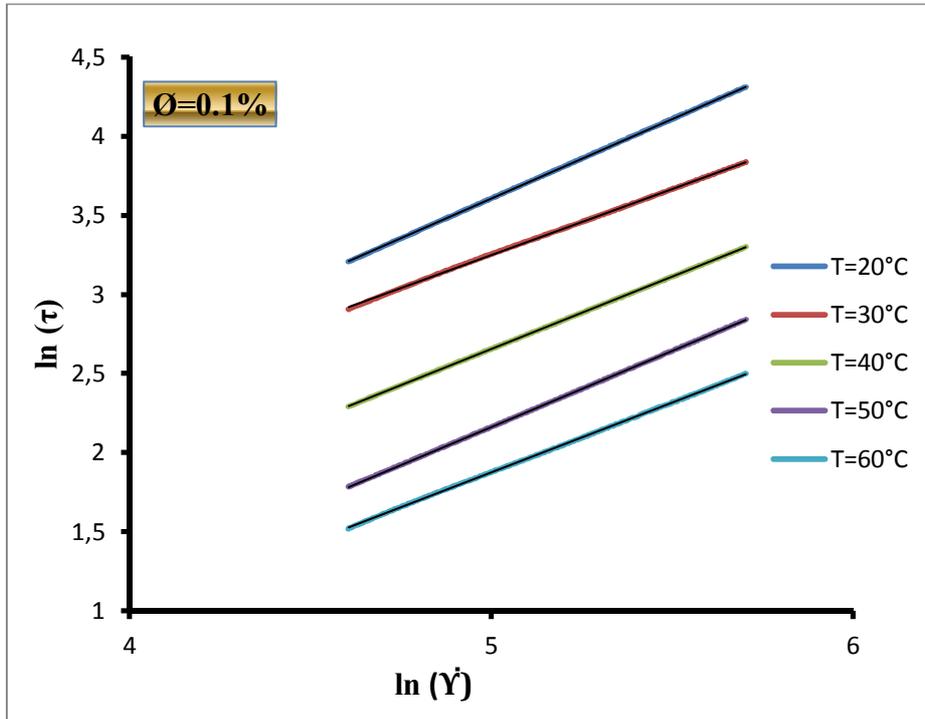


Figure (IV.13) : diagrammes logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du Taux de cisaillement à différentes températures pour une fraction volumique de 0.1%.

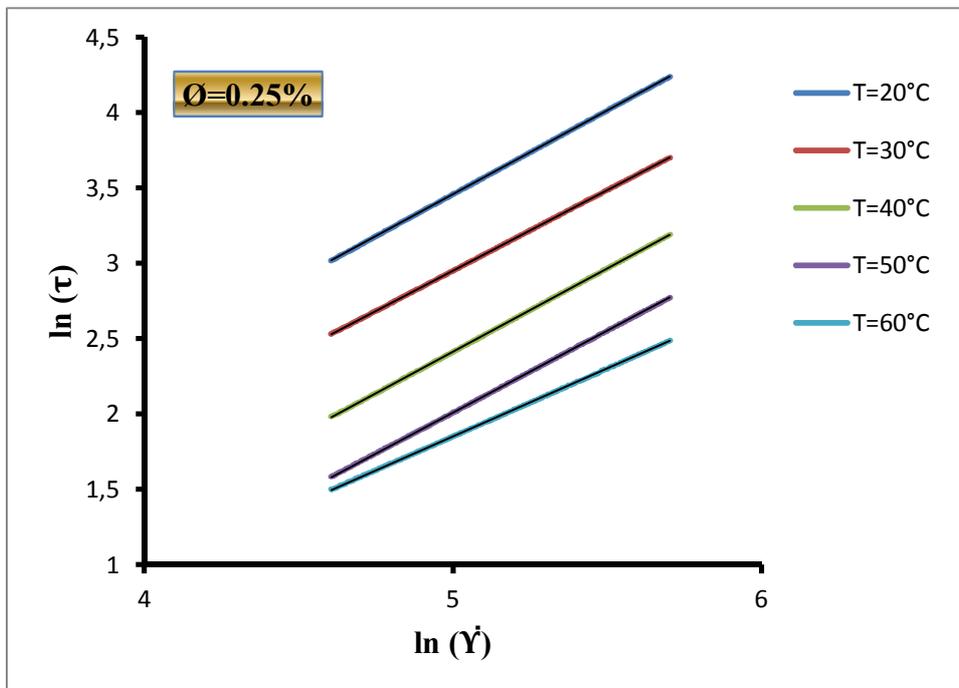


Figure (IV.14) : diagrammes logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du Taux de cisaillement à différentes températures pour une fraction volumique de 0.25%.

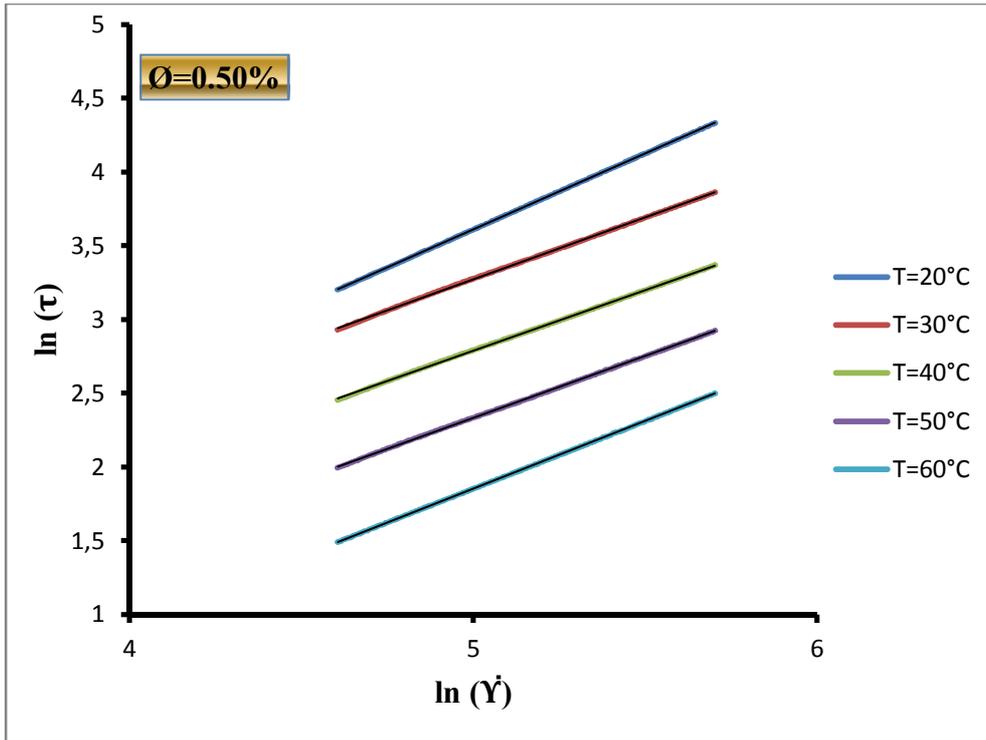


Figure (IV.15) : diagrammes logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du Taux de cisaillement à différente températures pour une fraction volumique de 0.50%.

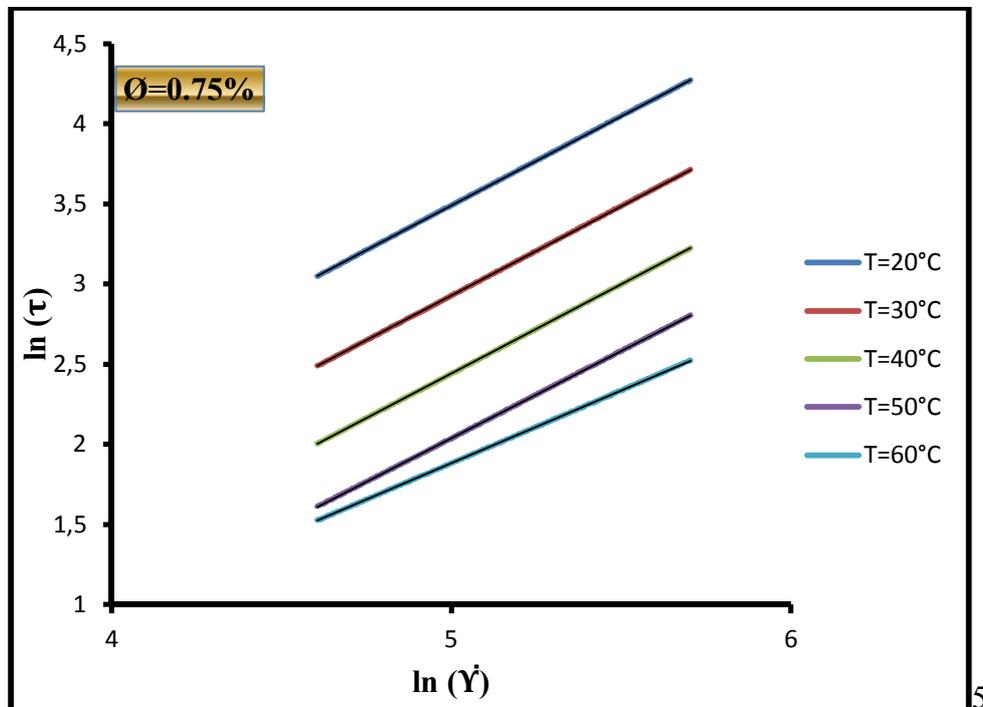


Figure (IV.16) : diagrammes logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du Taux de cisaillement à différente températures pour une fraction volumique de 0.75%.

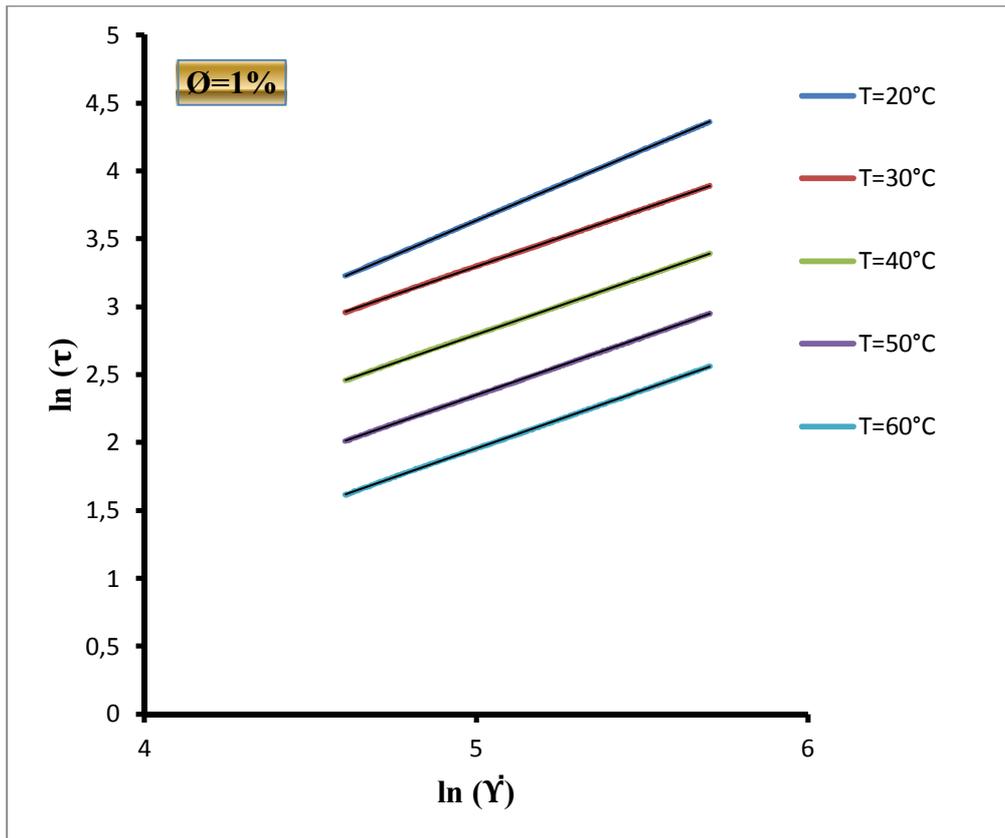


Figure (IV.17) : diagrammes logarithmique de la contrainte de cisaillement en fonction du Taux de cisailement à différentes températures pour une fraction volumique de 1%.

Les tableaux ci-dessous représentent les valeurs des indices de consistance et de loi de puissance pour le nano lubrifiant ZnO/SAE10W40, pour toutes les fractions volumiques solides et avec différentes valeurs de températures :

Tableau (IV.3) : indice de comportement « n » du ZnO/SAE10W40.

T (°C)	Fraction volumique solides (%)				
	0.1	0.25	0.50	0.75	1
20	1.004	1.112	1.030	1.113	1.033
30	0.833	1.068	0.837	1.115	0.841
40	0.915	1.104	0.822	1.111	0.843
50	0.961	1.083	0.837	1.088	0.851
60	0.881	0.899	0.916	0.908	0.850

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau (IV.4) : indice de consistance « **K** » du ZnO/SAE10W40.

T (°C)	Fraction volumique solide (%)				
	0.1	0.25	0.50	0.75	1
20	0.2421	0.1220	0.2137	0.1251	0.2161
30	0.3993	0.0917	0.4001	0.0707	0.4029
40	0.1446	0.0447	0.2658	0.0442	0.2409
50	0.0711	0.0331	0.1561	0.0333	0.1479
60	0.1220	0.0710	0.0651	0.0699	0.0977

IV.3-Analyse des résultats :

Pour donner une analyse rhéologique à un comportement d'un fluide, il est nécessaire de mettre en évidence les relations entre les paramètres de l'écoulement et les fonctions qui régissent bien cet écoulement.

Les figures (IV.1), (IV.2), (IV.3) et(IV.5) représentent des rhéogrammes montrent les variations de la contraintes de cisaillement en fonction du Taux de cisaillement pour le nano lubrifiant ZnO/SAE10W40, à différentes températures et pour toutes les fractions volumique dans une plage de cisaillement de $100S^{-1}$ à $300S^{-1}$, et dans un intervalle de températures varie entre (20°C) à (60°C), on a remarqué que la contrainte de cisaillement augmente avec l'augmentation du vitesse de cisaillement pour toutes les fractions volumique, les valeurs de contraintes sont faibles pour les hautes températures, par contre elles sont des hautes valeurs avec les faibles températures. Donc la température influe sur la contrainte de cisaillement.

Les figures (IV.6), (IV.7), (IV.8), (IV.9) et (IV.10) représentent des rhéogrammes montrent les variations de la viscosité dynamique en fonction du Taux de cisaillement pour le nano lubrifiant ZnO/SAE10W40, à différentes températures et pour toutes les fractions volumique dans une plage de cisaillement de $100S^{-1}$ à $300S^{-1}$, et dans une intervalle de températures varie entre (20°C) à (60°C). On a remarqué dans ce cas que la viscosité s'augmente avec l'augmentation du taux de cisaillement à la basse temperature 20°C, mais à chaque fois la température augmente, les valeurs de viscosité se commencent à diminuer jusqu'à presque la stabilisation à la plus haute valeur de températures 60°C. Donc on a conclu que la haute

Chapitre IV : Résultats et discussion

température fait chuter la viscosité quel que soit la fraction volumique et le Taux de cisaillement.

La figure (IV.11) montre une courbe représente la variation de la viscosité dynamique en fonction de la température pour différentes fractions volumiques solides, et avec un Taux de cisaillement constant égale à 100S^{-1} , on a remarqué que la viscosité dynamique se diminue avec l'augmentation de température pour toutes les fractions volumiques. Donc l'augmentation de températures fait chuter la viscosité du ZnO/SAE10W40.

La figure (IV.12) représente une courbe de viscosité dynamique en fonction de fraction volumique à température constante de 60°C et de Taux de cisaillement fixe de 100S^{-1} , d'après cette figure à une vitesse de cisaillement spécifique, la viscosité diminue avec les faibles concentrations volumiques entre (0.1% et 0.50%), à la fraction 0.50% la viscosité est améliorée, et elle commence à augmenter avec les hautes fractions volumiques.

Selon les tableaux (IV.3 et IV.4), le nano lubrifiant ZnO/SAE10W40 est un fluide non newtonien, son comportement se change entre le rhéofluidifiant et le rhéoépaississant dépend à la température et la fraction volumique, connaissant que la nature de l'huile SAE10w40 est non newtonien de comportement rhéofluidifiant, donc l'ajout des nano particules ZnO modifie brusquement la structure de l'huile de base, la différence entre la nature brownienne des nanoparticules et l'huile de base conduit à briser les liens et former des nouveaux liens .

Ainsi d'après les résultats trouvés de n et K à les fractions volumiques 0.1%, 0.5% et 1%, le nano lubrifiant ZnO/SAE10w40 a un comportement rhéofluidifiant.

Par contre à les fractions volumiques 0.25% et 0.75% le nano lubrifiant ZnO/SAE 10w40 a un comportement rhéoépaississant.

Le comportement du ZnO/SAE10W40 à la haute température 60°C avec toutes les fractions volumiques est rhéofluidifiant.

Le comportement à la plus basse température 20°C avec toutes les fractions volumiques est rhéoépaississant.

Conclusion générale

Conclusion générale

Pour identifier les caractéristiques des nano-lubrifiant, le comportement rhéologique du nano-lubrifiant ZnO/SAE10W40 a été étudié à différentes températures et pour différentes échantillons avec des fractions volumiques solides. Pour réaliser ce travail, divers échantillons avec des fractions volumiques solides de 0.1%, 0.25%, 0.50%, 0.75% et 1% ont été étudiés. La viscosité du nano-lubrifiant a été mesurée à différentes valeurs de températures varies de 20°C à 60°C et de Taux de cisaillement entre 100 S⁻¹ à 300 S⁻¹ avec un rhéomètre modulaire compact MCR 302.

Les conclusions extraites de notre travail sont :

- 1) Une variation non linéaire de la viscosité en fonction du taux de cisaillement des nano-lubrifiants signifie qu'elle est un fluide non-newtonien
- 2) A une vitesse de cisaillement spécifique, la viscosité dynamique se diminue pour une faible fraction volumique entre 0.1% et 0.50% et à la fraction de 0.50% la viscosité est améliorée. par contre la viscosité commence à augmenter avec les hautes fractions volumiques.
- 3) A un Taux de cisaillement constant égal à 100S⁻¹, la viscosité dynamique se diminue avec l'augmentation de température pour toutes les fractions volumiques. Ça signifie que l'augmentation de températures fait chuter la viscosité du ZnO/SAE10W40.
- 4) Le comportement du nano-lubrifiant ZnO/SAE10w40 dépend à la température et à la fraction volumique solide, le comportement est entre le rhéofluidifiant pour les fractions de 0.1%, 0.5% et 1%, et rhéoépaississant pour les fractions volumique solide de 0.25% et 0.75%.

Partie bibliographique

Références bibliographiques

- [1] <http://www.uniiversals.fr/encyclopedie/rhéologie>.
- [2] **M.Khledj Riyadh ; M.Sellaoui Ahmed**, « étude expérimentale du comportement rhéologique du nano lubrifiant Fe_2O_3 » Master 2, Département de génie mécanique- université Djilali Bounaama-Khmis Meliana-2017/2018.
- [3] **COUSSOT P. ;-L GROSSIORD**, « comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton », **article** : des concepts aux outils-L.GROSSIORD' et D. QUEMADA.
- [4] **G.COURRAZE ; J.L. ROSSIORD** « initiation à la rhéologie » Tech et doc 1991.
- [5] **MICHEL ROQUES**, « contrôle industriel et régulation automatique, mécanique des fluides », 2005.
- [6] **Soufi Abdelmadjid ; Souidi Fatima Zahra Asma**, « caractérisations rhéologique des fluides complexes-application au domaine de l'industrie agro –alimentaire » Master 2, Département de génie mécanique université Ibn Khaldoun-Tiaret-2014/2015.
- [7] **HAMILTON ; R.T.and crosser O.K** « thermal conductivity and heterogenous two component system industriel and engineering chemisty fondamentales 1(3).187.191(1962).
- [8] <http://Patrick.kohl.pagesperso-orange.fr/rhéologie/rheo>.
- [10] **N.MIDOUX**, Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimie, technique et documentation-Lavoisier, 1985.
- [11] **GUILLEMIN J.P., WERCKERLE A., BRUNETL. ; BONNEFOY O. ; THOMSON G.** « Application d'un modèle de viscosité à la coulée d'explosifs : Modélisation du temps de coulée. » rhéologie 10(2006)40-48.
- [12] **NGUYEN C.T., DESGRANGES F., ROY G., GALANIS N., MARE T., BOYCHERS., ANGUE MINTSAH.**, « temperature and particle-size deoendent viscosity data for water-based nanofluids-hysteresis phenomenon ».international journal of heat an fluid flow 28(2007)1492-1506.
- [13] Assael M. J., Chen C. F., Metaxa I., and Wakerham W. A : Thermal Conductivity of suspensions of Carbon Nanotubes in Water. International Journal of Thermophysics, 25(2004).
- [14] <https://www.researchgate.net/profile/Florence-Gibouin/publication/297620925/figure/fig84/AS:669661280612362@1536671099924/Rheogramme-dun-fluide-rheofluidifiant-en-bleu-et-dun-fluide-rheopaississant-en.ppm>
- [15] https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTfDw5oNXoWm60UCVki7gLx4dx3zbA4rUxmtHuyRZBd0_HjPD3yPEhoigQ51w&s .
- [16] https://viscositedesfluides.files.wordpress.com/2014/01/capture-d_c3a9cran-2014-01-23-c3a0-22-20-30.png .
- [17] **Mouassi Ammar** ; « intensification des échanges de chaleur par l'utilisation des nano fluides », Mémoire de magister, Département de transport et équipements des hydrocarbures, laboratoire de génie physique, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes-(2012).
- [18] **Ribeiro J., P., Gruss J., A** : Nano fluide pour applications thermique, techniques de l'ingénieur 2^{ème} éditions (2009).

Références bibliographiques

- [19] **Lammer Zaggag Asmaa** ; « contribution à l'étude théorique dans transferts thermiques convectifs dans un nano fluide, application aux modèles monophasique et diphasique », mémoire de magister, département de physique-université Frères Mentouri –Constantine-(31/12/2014).
- [20] **Tsai C.Y, H. T. chien, P. P Ding, B chan, T, Y Luch, P. H Chen**, Effet of structural character f gold nanoparticules in nanofluide on heat pipe thermal performans, *Materiel Letters* 58, pp.1461-1465, (2004).
- [21] **Tseng S.C, C.W lind and K.D huang**. heat transfer enhancement of nanofluids in Rotary blade cooling of new correlations. *I.J. Of Heat and Mass transfer* 52. pp, 4675-4682, (2009).
- [22] **Zeng Z and Q Que**, Synthesis structure and lubricating properties of Dialky idithiophosphate-Modified Mo-S Compound Nanoclusters, *Wear* 209, pp.8-12, (1997).
- [23] **You S.M, J.H Kim and K.H Kim**, Effet of nanoparticules on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer. *Applied Physique Letter* 83, pp.407-411, (2004).
- [24] **Vassallo P, R Kumar and Malasekra**, An Introduction to computational Fluid Dynamics-The journal of thermophysics and Heat transfer 13, pp.407-411, (2004).
- [25] **Jordan A, R Scholz, P, Wust, H FaMng and R Felix**, Magnetic Fluid Hypothetmia (MFH) :Cancer treatment With AC Magnetic Field Induced Excitation of Biocompatible superparamagnetic Nanoparticules *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 201. pp.413-419, (1999).
- [26] **Einstein A**, : Investigations on the theory of the Brounian Movement Dover Publications ; New York, (1956).
- [27] **Brinkman H.C** : The viscosity of the concentrated suspensions and solutions. *J.Chen, phys.*, 20,571-581, (1952).
- [28] **Maxwell J.C**. : A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K.(1891).
- [29] **Chouireb, Housseem, Eddin** ; « Simulation numérique de la convection mixte dans un dissipateur de chaleur radial (pour application des diodes electrominescente, LED) », Mémoire de master en génie mécanique, université Mohamed Boudiaf-M'sila-2017/2018.
- [30] **R.L. Hamilton and O.K. Crosser**. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 1(3), pp.187-191, (1962).5
- [31] **B.C. Pak and Y.I. Choi**. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), pp.151–170, (1998).
- [32] **Xuan Y, and Roetzel W**. : Conception for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 43(19) ,3701_3707. (2009).
- [33] WWW.castrol.com/fr_fr/france/car-engine-oil/huile-moteur-par-viscosité/10w-40.html

في هذه العمل، قمنا بدراسة السلوك الانسيابي لزيت التشحيم النانوي من خلال نهج تجريبي، استعملنا طريقة الخطوتين، يعني قمنا بمزج الجزيئات النانوية في زيت المحرك، مع التركيز الحجمي للجزيئات تقدر ب: 0.1%، 0.25%، 0.50%، 0.75%، 1%، تم قياس اللزوجة في درجات حرارة من 20°C 30°C 40°C 50°C 60°C بمعدلات قص تتراوح من 100 إلى 300 بعد تحليل النتائج، تم الكشف أن زيت ألتشحيم النانوي المدروس هم مائع غير نيوتوني •

سيولة بالقص. كلمات المفتاحية: زيت التشحيم، الانسيابية، اللزوجة، مقياس ريوماتر، السائل النانوي ZnO/SAO10w40

Résumé :

Dans notre travail, on a étudié le comportement rhéologique du nano-lubrifiant ZnO/SAE10w40 par une approche expérimentale. On a utilisé la méthode des deux étapes ,c'est à dire on a dispersé les nanoparticules de ZnO dans l'huile moteur SAE10w40 avec différentes fraction volumiques solides de 0.1% , 0.25%, 0.50%, 0.75% et 1%. la viscosité a été mesuré dans des plages des températures de 20°C 30°C 40°C 50°C et 60°C. Avec un intervalle de Taux de cisaillement de 100 S⁻¹ à 300 S⁻¹. Après l'analyse des résultats, il a été relevé que le nano-lubrifiant étudié est un fluide non newtonien.

Mots clés : Nano-lubrifiant, comportement rhéologique, fluide non newtonien. Viscosité ,rhéometre , nano-fluide ZnO/SAO10w40

Abstract :

In our work, we investigated a rheological behavior of ZnO/SAE10w40 with experimental approach, we used the two steps method, it means nanoparticles were dispersed in SAE10w40 engine oil with different solid volume fractions of 0.1%, 0.25%, 0.50%, 0.75% et 1%. the viscosity was measured in temperature range from 20°C, 30°C, 40°C, 50°C and 60°C. and at shear rates ranging from 100 S⁻¹ to 300 S⁻¹. After analysing the results, it was revealed that the nano-lubricants are non-Newtonian fluids.

Keywords : Nano-lubricants, Rheological behavior, Non-Newtonian fluids.