

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 MECANIQUE



Laboratoire de Synthèse et Catalyse

THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT (L.M.D)

Spécialité : Génie Mécanique

Présentée par :

Mr. HARCHAOUI AHMED

THÈME

Etude expérimentale et simulation du comportement
rhéologique des nano-lubrifiants pour les applications
automobiles

Soutenue le 20/02/2025 devant le Jury composé de :

Président	Mr : N.SAD CHEMLOUL	Pr Université Ibn khaldoun Tiaret
Directeur de Thèse	Mr : MAZOUZI Ridha	Pr Université de Khemis Miliana
Co- Directeur de Thèse	Mr : KARAS Abdelkader	Pr Université Ibn Khaldoun, Tiaret
Examineur	Mr : LOUNIS Mourad	Pr Université de Khemis Miliana
Examineur	Mr : ABED Belkacem	MCA Université Ibn khaldoun Tiaret
Examineur	Mr : TRARI Benaïssa	MCA Université Ibn khaldoun Tiaret

Année universitaire 2024/2025

Cette thèse a été préparée au Laboratoire de synthèse et catalyse, Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Remerciements

En premier lieu J'aimerais bien évidemment débiter ces remerciements en remerciant ALLAH le tout Puissant qui m'a donné la force, le courage et la patience pour accomplir ce modeste travail. Je tiens à exprimer mes profondes reconnaissances et mes sincères remerciements à mon encadreur le professeur Mr. Pr MAZOUZI Ridha de m'avoir fait confiance, pour sa disponibilité et son suivi constant de ce travail.

Ainsi que mon Co-directeur de thèse le professeur Mr. Pr KARAS Abdelkader pour la confiance et l'aide qu'il m'a généreusement données avec beaucoup d'intelligence et de dynamisme.

Je suis très heureux de pouvoir exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Pr N.SAD CHEMLOUL pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à Mr LOUNIS Mourad, Mr ABED Belkacem et Mr TRARI Benaissa pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Mes profonds respects et mes vifs remerciements les plus distingués à Mr. Pr belhabib larbi chef du laboratoire de synthèse et catalyse de l'Université Ibn khaldoun de tiaret.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement mon ami Dr Mohamedi Ibrahim et Dr Rouibah Abdelkader et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour accomplir ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail:

*A la mémoire de mes défunt père et mère, puisse Dieu le miséricordieux
ait pitié de leur âme.*

A l'unique femme de ma vie;

A mes enfants;

A mes frères et sœurs;

A tous mes amis;

A tous ceux qui m'ont aidé et encouragé

Résumé

Les huiles lubrifiantes jouent un rôle important dans la plupart des systèmes d'ingénierie. L'amélioration des caractéristiques de ces huiles peut améliorer les performances des machines et des systèmes mécaniques. Parmi les caractéristiques mécaniques les plus importantes qui devraient être modifiées afin d'améliorer les performances des systèmes sont la viscosité, les propriétés rhéologiques et les caractéristiques de transfert de chaleur. Pour ce faire l'ajout de nanoparticules dans l'huile de base est l'une des solutions les plus appropriées qui est également relativement rentable.

Cette thèse fait l'objet d'étude des caractéristiques rhéologiques des nanolubrifiants réalisée à base de nanoparticules de Fe₂O₃, Al₂O₃ et ZnO. Le fluide de base utilisé était de l'huile moteur SAE20W40. Les échantillons de nanofluides ont été préparés en fractions volumiques solides (0,1%; 0,25 % ; 0,50 % ; 0,75 % et 1 %). Les mesures ont été effectuées à différentes températures, comprises entre 20 °C et 60 °C, et à des taux de cisaillement allant de 100 s⁻¹ à 300 s⁻¹. Une étude comparative a été menée. Les résultats obtenus ont montré que les nanofluides à base de nanoparticules de Fe₂O₃ et de ZnO présentaient un comportement rhéofluidifiant non newtonien tandis que le nanofluide à base de nanoparticules d'Al₂O₃ présentait un comportement newtonien. Le nanofluide Al₂O₃/huile avait une viscosité dynamique inférieure à celle des nanofluides Fe₂O₃/huile et ZnO/huile. L'augmentation de la température a entraîné une réduction de plus de 80 % de la viscosité pour tous les nanofluides. En revanche, l'augmentation de la concentration volumique des nanoparticules a clairement augmenté la viscosité dynamique.

Les réseaux de neurones artificiels ont été appliqués pour la modélisation de la viscosité dynamique des nanofluides. Les résultats ont montrés que ces modèles neuronaux peuvent être utilisés comme des outils fiables et performants pour le calcul de la viscosité dynamique.

Mots clés : Viscosité, Nanofluide, Comportement rhéologique, Nanoparticules, Huile lubrifiante, Réseaux de neurones,

Abstract

Lubricating oils play an important role in most engineering systems. Improving the characteristics of these oils can improve the performance of machines and mechanical systems. Among the most important mechanical characteristics that should be modified in order to improve the performance of the systems are viscosity, rheological properties and heat transfer characteristics. To do this, adding nanoparticles to the base oil is one of the most suitable solutions which is also relatively cost-effective.

This thesis is the subject of the study of the rheological characteristics of nanolubricants made from Fe₂O₃, Al₂O₃ and ZnO nanoparticles. The base fluid used was SAE20W40 engine oil. The nanofluid samples were prepared in solid volume fractions (0.1%; 0.25%; 0.50%; 0.75% and 1%). The measurements were carried out at different temperatures, between 20 °C and 60 °C, and at shear rates ranging from 100 s⁻¹ to 300 s⁻¹. A comparative study was carried out. The results obtained showed that the nanofluids based on Fe₂O₃ and ZnO nanoparticles exhibited non-Newtonian shear-thinning behavior while the nanofluid based on Al₂O₃ nanoparticles exhibited Newtonian behavior. The Al₂O₃/oil nanofluid had a lower dynamic viscosity than the Fe₂O₃/oil and ZnO/oil nanofluids. Increasing the temperature resulted in a more than 80% reduction in viscosity for all nanofluids. On the other hand, increasing the volume concentration of the nanoparticles clearly increased the dynamic viscosity.

Artificial neural networks have been applied for modeling the dynamic viscosity of nanofluids. The results showed that these neural models can be used as reliable and efficient tools for calculating dynamic viscosity.

Keywords: Viscosity, Nanofluid, Rheological behavior, Nanoparticles, Lubricating oil, Neural networks,

ملخص

تلعب زيوت التشحيم دورًا مهمًا في معظم الأنظمة الهندسية. وتحسين خصائص هذه الزيوت يمكن أن يحسن أداء الآلات والأنظمة الميكانيكية. ومن أهم الخصائص الميكانيكية التي يجب تعديلها لتحسين أداء الأنظمة هي اللزوجة والخصائص الريولوجية وخصائص نقل الحرارة.

وللقيام بذلك، تعد إضافة الجسيمات النانوية إلى الزيت الأساسي أحد الحلول الأكثر ملائمة وهو أيضًا فعال من حيث التكلفة نسبيًا. هذه الأطروحة هي موضوع دراسة الخصائص الريولوجية للمزقات النانوية المصنوعة من الجسيمات النانوية Fe₂O₃ و Al₂O₃ و ZnO. السائل الأساسي المستخدم هو زيت المحرك SAE20W40.

تم تحضير عينات الموائع النانوية حسب النسبة الحجمية للمادة الصلبة (0.1%، 0.25%، 0.50%، 0.75%)، و1%). تم إجراء القياسات عند درجات حرارة مختلفة، بين 20 درجة مئوية و60 درجة مئوية، وبمعدلات قص تتراوح بين s⁻¹100 إلى s⁻¹300.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الموائع النانوية المبنية على جسيمات Fe₂O₃ وأكسيد الزنك النانوية أظهرت سلوك ترقق قص غير نيوتوني بينما أظهرت الموائع النانوية المبنية على جسيمات Al₂O₃ النانوية سلوكًا نيوتونيًا. كان للسوائل النانوية Al₂O₃/الزيت لزوجة ديناميكية أقل من الموائع النانوية Fe₂O₃/الزيت وأكسيد الزنك/الزيت. أدت زيادة درجة الحرارة إلى انخفاض اللزوجة بنسبة تزيد عن 80% لجميع السوائل النانوية. من ناحية أخرى، زيادة تركيز حجم الجسيمات النانوية أدى بشكل واضح إلى زيادة اللزوجة الديناميكية.

تم تطبيق الشبكات العصبية الاصطناعية لنمذجة اللزوجة الديناميكية للسوائل النانوية. أظهرت النتائج أن هذه النماذج العصبية يمكن استخدامها كأدوات موثوقة وفعالة لحساب اللزوجة الديناميكية.

الكلمات المفتاحية: اللزوجة، الموائع النانوية، السلوك الريولوجي، الجسيمات النانوية، زيوت التشحيم،

الشبكات العصبية.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

<i>Remerciements</i>	
<i>Dédicaces</i>	
<i>Résumé</i>	
<i>Table des matières</i>	
<i>Notations et symboles</i>	
<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Introduction Générale</i>	1
 <u>CHAPITRE 1: Généralité sur les Nanofluides</u>	
<i>I.1 Introduction</i>	4
<i>I.2 Définition</i>	4
<i>I.3 Nanoparticules et les fluides porteurs</i>	5
<i>I.4 Fabrication et préparation des nanofluides</i>	8
<i>I.5 Propriétés thermophysiques des nanofluides</i>	10
<i>I.5.1 La masse volumique</i>	10
<i>I.5.2 La chaleur spécifique</i>	11
<i>I.5.3 La conductivité thermique des nanofluides</i>	12
<i>I.5.4 La viscosité dynamique</i>	13
<i>I.6 Domaines d'applications des nanofluides</i>	15
<i>I.7 Rhéologie des Nanofluides</i>	18
<i>I.7.1 Introduction</i>	18
<i>I.7.2 Grandeurs rhéologiques</i>	18
<i>I.7.2.1- Contrainte de cisaillement</i>	19
<i>I.7.2.2- Taux de cisaillement</i>	20
<i>I.7.2.3- Viscosité</i>	22
<i>I.7.3 Modèles rhéologiques</i>	23
<i>I.7.3.1- Fluides newtoniens</i>	23
<i>I.7.3.2- Fluides non newtoniens au comportement indépendant du temps</i>	24

TABLE DES MATIERES

<i>I.7.3.3- Fluides non newtoniens au comportement dépendant du temps</i>	28
<i>I.7.3.4 - Fluides viscoélastiques</i>	29
<i>I.7.4- Les rhéomètres</i>	30
<i>I.7.4.1- Présentation</i>	30
<i>I.7.4.2- Les rhéomètres rotatifs</i>	30
<i>I.7.5 Paramètres influençant la rhéologie des nanofluides</i>	31
<i>I.5.1 Influence de la concentration volumique</i>	31
<i>I.5.2 Influence du taux de cisaillement</i>	32
<i>I.5.3 Influence de la température sur la viscosité dynamique</i>	32
<i>I.8 Etat de l'art</i>	33
<i>I.8.1 Nanoparticules d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)</i>	33
<i>I.8.2 Nanoparticules d'oxyde de fer(III) (Fe_2O_3)</i>	34
<i>I.8.3 Nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO)</i>	35
<i>I.9 Conclusion</i>	37

CHAPITRE II : Matériaux et Dispositifs Expérimentaux

<i>II .1 Introduction</i>	38
<i>II.2 Préparation des nanofluides</i>	38
<i>II.2.1 Présentation des nanoparticules</i>	38
<i>II.2.1.1 L'oxyde de fer (Fe_2O_3)</i>	38
<i>II.2.1.2 L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)</i>	39
<i>II.2.1.3 L'oxyde de zinc (ZnO)</i>	40
<i>II.2.2 Présentation du fluide de base</i>	42
<i>II.3 Procédure de préparation</i>	43
<i>II.4 Mesures rhéologiques</i>	47
<i>II.4.1 Dispositif expérimental</i>	47
<i>II.4.2 Déroulement des essais</i>	49
<i>II.5 Conclusion</i>	51

TABLE DES MATIERES

<u>CHAPITRE III</u> : Caractérisation Rhéologiques des Nanolubrifiants	52
Résultats et Discussion	52
	52
III.1 Introduction.....	55
III.2 Résultats et discussion.....	55
III.2.1 Analyse XRD.....	61
III.2.2 Analyse du comportement rhéologique.....	62
III.2.2.1 Effet du taux de cisaillement sur la viscosité	65
III.2.2.2 Effet de la température sur la viscosité.....	
III.2.2.3 Effet de la concentration sur la viscosité.....	
III.3 CONCLUSION.....	
<u>CHAPITRE IV</u> : Modélisation du comportement Rhéologique du	
Nanofluide $Fe_2O_3/SAE20W40$ par Application des	66
Réseaux de Neurones	66
	69
IV.1 Introduction	69
IV.2 Principe d'un réseau de neurone artificiel	70
IV.3 Les réseaux de neurone.....	71
IV.3.1 Définition.....	72
IV.3.2 Réseaux de neurones statiques (réseaux non bouclés).....	72
IV.3.3 Réseaux de neurones dynamiques ou réseaux bouclés (ou récurrents).....	72
IV.4 Types d'apprentissage.....	73
IV.4.1 L'apprentissage supervisé.....	73
IV.4.2 L'apprentissage non supervisé.....	74
IV.6 Modèles des réseaux de neurones.....	74
IV.6.1 Réseau de neurone monocouche : le perceptron.....	76
IV.6.4 Perceptron multicouche (MLP)	78
IV.7 Procédure de modélisation par les réseaux de neurones.....	81
IV.7.1 Méthodes de résolution	84
IV.7.2 Evaluation de la performance	86

TABLE DES MATIERES

<i>IV.7.3 Résultats numériques et discussion</i>	<i>87</i>
<i>IV.7.4 Organigramme du soft.....</i>	
<i>IV.8 Conclusion.....</i>	
<i>Conclusion Générale et perspectives.....</i>	
<i>Références Bibliographiques</i>	

Notations et symboles

Symboles latins:

A_f	: le facteur de précision
B_f	: le facteur de biais
C_p	: la chaleur spécifique (kJ/(kg * K))
E	: Module d'élasticité (N / m ²)
F	: Force en N
k	: Conductivités thermiques (W/mK)
K	: Indice de consistance En Pa.s ⁿ
K et K'	: Les Critères d'acceptabilité
LMI	: L'indice de Legates-Mccabe's
M	: Masse (Gr)
N	: Facteur de forme empirique
MRAE	: L'erreur absolue relative moyenne
MSE	: L'erreur quadratique moyenne
N	: Indice d'écoulement sans dimension avec $0 < N < 1$
Q	: La capacité calorifique (J.K ⁻¹)
\textcircled{R}	: Le coefficient de corrélation
R^2	: Le coefficient de détermination
T	: Température (°C)
V	: Volume (m ³)
WI	: L'indice de Wilmot
X	: La Valeur du vecteur d'origine
Y_n	: La valeur de vecteur normalisée par le vecteur x .

Symboles grecs

γ	:	Le Taux de cisaillement (s^{-1})
μ	:	La viscosité dynamique (mPa.s)
ρ	:	Densité (kg/m ³)
τ	:	La contrainte de cisaillement (Pa)
φ	:	Fraction volumique des nanoparticules (%)
$\dot{\gamma}$:	La vitesse de cisaillement (gradient de vitesse)
ν	:	La viscosité cinématique

Indices :

<i>bf</i>	:	Fluide de base
<i>eff</i>	:	Effective
<i>f</i>	:	Fluide de base.
<i>nf</i>	:	Nanofluide
<i>pl</i>	:	Plastique
<i>s</i>	:	Solides

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Liste des figures

Figure I.1	(a) Nanoparticules sphériques ; (b) Nanotubes de carbone	5
Figure I.2.	Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape	9
Figure I.3.	Procédé de synthèse de nanofluide en deux étapes	10
Figure I.4.	Domaines d'applications des nanofluides.....	16
Figure I.5.	Schéma de l'écoulement de cisaillement.....	19
Figure I.6.	Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.....	20
Figure I.7.	Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles..	21
Figure I.8	Viscosité d'un liquide Newtonien.....	24
Figure I.9	Rhéogrammes des fluides (a) rhéo-fluidifiant, (b) newtonien, (c) rhéo-épaississants et (d) à seuil.....	24
Figure I.10	Diagramme logarithmique contrainte de cisaillement - taux de Cisaillement.....	26
Figure I.11	Courbe d'écoulement d'un fluide à seuil.....	28
Figure I.12	Courbe viscosité-temps d'un matériau thixotrope.....	28
Figure I.13	Courbe viscosité-temps d'un matériau rhéopectique.....	29
Figure I.14	Différentes géométries de rhéomètres rotatifs : (a) Couette (b) Cône- Plan (c) Plan-Plan.....	31
Figure II.1	Nanoparticules d'oxyde de fer	38
Figure II.2	Nanoparticules d'oxyde d'aluminium ou alumine.....	39
Figure II.3	Nanoparticules d'oxyde de zinc.....	41
Figure II.4	Emballage commercial de l'huile SAE 20W40.....	42
Figure II.5	Balance de précision.....	45
Figure II.6	Agitateur Magnétique.....	45
Figure II.7	Homogénéisateur à Ultrasons UP 200H.....	46
Figure II.8	Les nanoparticules Fe_2O_3 , Al_2O_3 , et ZnO et leurs nanofluides correspondants.....	46
Figure II.9	Rhéomètre Anton Paar MCR 302.....	47
Figure II.10	Géométrie de mesure : cylindres à double entrefer concentriques..	48
Figure II.11	Accessoires du rhéomètre MCR 302	48
Figure II.12	Interface du projet.....	50
Figure III.1	Diffractomètre DRX Rigaku MiniFlex 600.....	53
Figure III.2	Schéma descriptif du principe de fonctionnement du diffractomètre à rayons X.	53
Figure III.3	Spectre de diffraction des rayons X des nanoparticules Fe_2O_3 , Al_2O_3 et ZnO	54
Figure III.4	Viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour différentes températures ; $\varphi=1\%$	55
Figure III.5	Viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement ; $\varphi=0.5\%$	57
Figure III.6	Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ; $\varphi=0.5\%$	59

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure III.7. Diagramme logarithmique contrainte de cisaillement - taux de cisaillement, $\phi = 0.75\%$	59
Figure III.8 Indices de consistance et de la loi de puissance pour $\phi=0.5\%$	61
Figure III.9 Viscosité dynamique en fonction de la température pour différentes concentrations ; $\gamma=200s^{-1}$	62
Figure III.10 Viscosité dynamique en fonction de la concentration volumique..	64
Figure .IV.1. Exemple de neurone biologique	67
Figure IV.2. Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel...	68
Figure IV.3. a- Fonction de Heaviside, b-Fonction signe	70
Figure IV.4. a- Fonction linéaire à seuil, b- Fonction sigmoïde.....	70
Figure IV.5 structure d'un réseau de neurones non bouclé.....	71
Figure IV.6. Réseau de neurones bouclé à deux entrées.....	71
Figure IV.7. Apprentissage supervisé.....	72
Figure IV.8. Apprentissage non supervisé.....	73
Figure IV.9. Réseau de neurone monocouche : le perceptron	73
Figure IV.10. Perceptron multicouche (MLP)	74
Figure IV.11. Procédure de modélisation par les réseaux de neurones.....	75
Figure IV.12. Architecture typique du réseau de neurones artificiel th.....	77
Figure IV.13: Diagramme de régression du réseau de neurones artificiel de la viscosité dynamique η	83
Figure IV. 14. Interface du programme pour la prédiction de la Viscosité dynamique η au moyen des réseaux de neurones artificiels.....	85

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Liste des tableaux

Tableau I.1	Combinaisons nanoparticules/fluides de base	8
Tableau I.2	Rapport des viscosités du nanofluide (Al_2O_3 +eau) obtenus a partir des différents modèles étudiés.....	15
Tableau I.3	Valeurs de viscosité de fluides (à 20°C et à pression atmosphérique normale)	22
Tableau II.1	Caractéristiques du nanoparticule Fe_2O_3	39
Tableau II.2	Caractéristiques du nanoparticule Al_2O_3	40
Tableau II.3	Caractéristiques du nanoparticule ZnO	41
Tableau II.4	Caractéristiques du huile lubrifiante SAE20W40.....	43
Tableau II.5	Masse des nanoparticules Al_2O_3 , Fe_2O_3 et ZnO	44
Tableau II.6	Caractéristiques du rhéomètre rotatif à contrainte imposée MCR302.....	49
Tableau III.1	Indices de consistances et de puissances.....	60
Tableau IV.1	Plage des variables.....	78
Tableau IV.2	Performance métriques du RNA.....	81
Tableau IV.3	Etude comparative entre le modèle neuronale et expérimentale...	84

Introduction Générale

La nanotechnologie est un domaine émergent de la science et de l'ingénierie qui pourrait révolutionner de nombreuses industries. La nanotechnologie fait référence à la manipulation de la matière au niveau moléculaire ou atomique, permettant un contrôle extrêmement précis des matériaux. L'importance de la nanotechnologie réside dans sa capacité à créer des dispositifs incroyablement petits dotés de capacités remarquables qui pourraient avoir des implications considérables pour la société telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Les nanofluides sont des systèmes colloïdaux dilués dans lesquels des particules de taille nanométrique (5 à 100 nm) sont dispersées dans un fluide de base. Ces particules nanométriques peuvent être constituées de divers matériaux, tels que des métaux, des oxydes métalliques ou des matériaux à base de carbone. L'intérêt pour les nanofluides vient de leurs propriétés uniques et de leurs applications potentielles dans divers domaines, notamment le transfert de chaleur, la lubrification des mécanismes, les applications électrotechniques, le traitement de l'eau, etc.

L'étude du comportement rhéologique des nanolubrifiants est un domaine de recherche important qui a connu un essor remarquable ces dernières années. Les nanolubrifiants sont un type de lubrifiant qui contient des particules à l'échelle nanométrique et leurs propriétés peuvent différer considérablement de celles des lubrifiants traditionnels. Pour mieux comprendre le comportement de ces matériaux dans diverses conditions, il est nécessaire d'examiner leurs caractéristiques rhéologiques telles que la viscosité, la contrainte de cisaillement et la sensibilité à la vitesse de déformation. Ces connaissances peuvent ensuite être utilisées pour identifier des applications potentielles pour les nanolubrifiants ou améliorer celles existantes.

Il a été découvert que les nanolubrifiants fabriqués à partir de nanoparticules d'oxyde possèdent des caractéristiques rhéologiques uniques, telles qu'une viscosité accrue et un frottement réduit. Ces propriétés sont bénéfiques dans une grande variété d'applications, notamment les composants automobiles et les dispositifs médicaux. Les nanolubrifiants offrent également une stabilité thermique supérieure par rapport

Introduction Générale

aux produits de lubrification traditionnels, ce qui les rend idéaux pour une utilisation dans des environnements à haute température ou à pression extrême. De plus, les nanolubrifiants peuvent contribuer à réduire l'usure des pièces de machines grâce à leurs propriétés tribologiques améliorées et leur faible coefficient de friction. Alors que la recherche sur le développement de nanomatériaux continue de progresser à un rythme accéléré, il est probable que des formulations de nanolubrifiants plus avancées seront disponibles dans un avenir proche, avec des capacités de performance encore plus élevées que celles des produits actuellement disponibles sur le marché.

Plusieurs travaux expérimentaux et numériques sont réalisés pour mieux comprendre les propriétés des nanolubrifiants et la manière dont ils peuvent être utilisés dans diverses applications. Les études expérimentales permettent aux chercheurs d'étudier les propriétés physiques telles que la viscosité, la résistance au cisaillement, le coefficient de frottement, la résistance à l'usure, etc., tandis que les simulations numériques fournissent un aperçu du comportement des lubrifiants et permet de développer des modèles rhéologiques. En combinant ces deux approches, nous pouvons acquérir une compréhension plus approfondie des nanolubrifiants et de leurs utilisations potentielles dans les applications d'ingénierie modernes.

Une revue approfondie de l'état de l'art des résultats de la recherche réalisés sur la viscosité des nanolubrifiants a révélé que les nanolubrifiants présentent différents comportements rhéologiques (newtoniens et non newtoniens) en fonction de divers facteurs tels que le taux de cisaillement, la concentration et la température. Les données de la littérature provenant de différents groupes de recherche sont très dispersées et peu cohérentes, même pour les mêmes nanofluides. La raison pour laquelle, l'objectif de la présente thèse est de réaliser une étude comparative du comportement rhéologique de trois nanolubrifiants à base de trois nanoparticules d'oxyde.

Cette thèse s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une étude descriptive des nanofluides, leur composition, leurs méthodes de synthèse et leurs propriétés physiques et thermiques. Une étude sur la rhéologie en général et la rhéologie des nanofluides en particulier est présentée. Dans un deuxième temps, nous détaillons les travaux les plus représentatifs de la

Introduction Générale

littérature traitant les travaux expérimentaux sur les nanolubrifiants réalisés avec trois nanoparticules d'oxyde.

Nous présentons ensuite au deuxième chapitre les nanoparticules et le fluide de base utilisés pour la préparation des nanofluides ainsi que la procédure de préparation. Le dispositif expérimental utilisé est présenté en détail. Enfin, une description des manipulations est présentée avec les différents paramètres d'essais.

Dans le troisième chapitre, les résultats des essais expérimentaux sont présentés et interprétés. L'effet de différents paramètres sur la viscosité des nanolubrifiants est analysé. Une étude comparative du comportement rhéologique des nanolubrifiants est réalisée.

Le quatrième chapitre s'intéresse à l'application des réseaux de neurones artificiels RNA pour prédire la viscosité dynamique du nanofluide Fe_2O_3 /huile. Les performances de cette modélisation ont été exposées. Ainsi que la réalisation d'une application (programme) pour la prédiction de cette viscosité dynamique.

Finalement, on terminera par une conclusion générale de ce manuscrit et qui sera accompagnée d'un ensemble de perspectives à retenir pour des développements futurs.

CHAPITRE -I-

Généralités sur les Nanofluides

I.1 Introduction :

Avec les progrès récents en nanotechnologies, des particules de la taille des nanomètres peuvent être obtenues. Cet avancement technologique a donné l'idée de suspendre ces particules dans un liquide de base pour obtenir une amélioration de ces propriétés thermophysiques tel que la viscosité qui est la propriété majeure dans les huiles lubrifiantes qui sont des liquides visqueux utilisées pour la lubrification des parties mobiles des moteurs et des machines. Ce sont des produits pétroliers qui se dégradent après un certain temps d'utilisation, par contamination avec des éléments polluants. Pour améliorer les performances d'une huile lubrifiante, les chercheurs ont recours actuellement aux nanoparticules. L'ajout de ces nanoparticules à une huile de base permet d'obtenir un nano-lubrifiant avec des caractéristiques rhéologiques modifiées.

Ce chapitre se décompose en deux parties principales. La première partie présente une étude descriptive des nanofluides, leur composition, leurs méthodes de synthèse et leurs propriétés physiques et thermiques. Une seconde partie est axée sur la rhéologie en général et la rhéologie des nanofluides en particulier.

I.2 Définition :

La nanoscience a connu ces dernières décennies une expansion remarquable influençant les propriétés spécifiques de la matière aux dimensions nanométriques, ce qui permettra le développement des fluides aux propriétés originales. Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique (1 à 100 nm) (nanoparticules) en suspension dans un liquide qui s'appelle liquide de base. L'introduction des particules solides de taille nanométrique au sein d'un fluide de base a pour but d'améliorer les propriétés thermophysiques des fluides. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom de « Nanofluides ». Ce terme a été introduit par Choi au niveau du laboratoire d'Argonne au Etats unis d'Amérique en 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspensions colloïdales[1].

I.3 Nanoparticules et les fluides porteurs :

La nanoparticule 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). Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental, et sont très étudiées de nos jours. De nombreux physiciens et chimistes les synthétisent, d'autres physiciens les étudient afin de comprendre la physique de ces objets nanométriques et des biologistes les utilisent comme marqueurs cellulaires. Les nanoparticules peuvent être à base de métaux, d'oxydes, de carbures, de nitrures ou de carbone.

D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories Fig. (I.1).

- Les nanoparticules sphériques pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent ainsi être à base de métaux (l'aluminium Al, cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou d'oxydes (oxyde d'aluminium Al_2O_3 , oxyde de cuivre CuO, oxyde de zinc ZnO ou oxyde de titane TiO_2 ...).
- Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO_2 , Nanotube de silicium...)

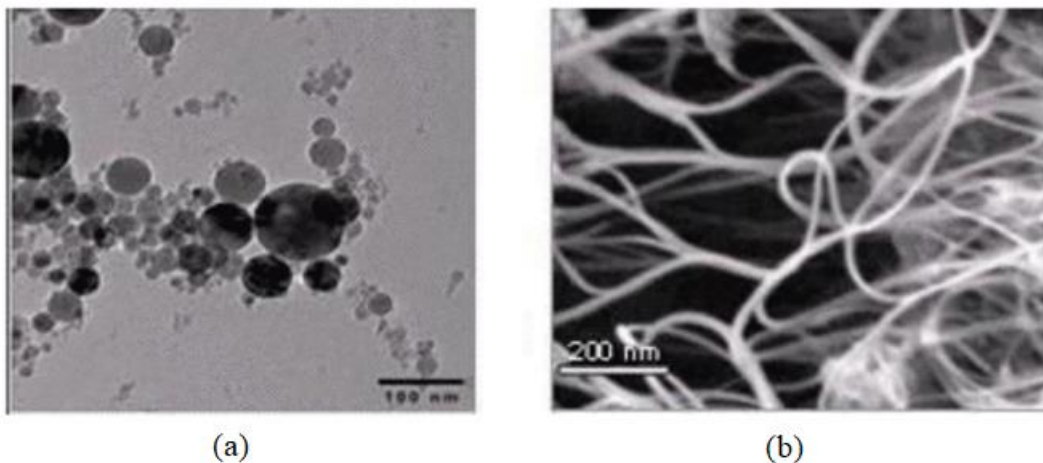


Figure I.1. (a) Nanoparticules sphériques ; (b) Nanotubes de carbone[2]

Diverses techniques chimiques et physiques sont disponibles pour élaborer des nanoparticules. Ces différentes méthodes permettent d'obtenir des nanoparticules libres ou enrobées, encapsulées dans une matrice hôte.

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

➤ Méthodes physiques :

La méthode la plus simple consiste à subdiviser un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique. Toutefois, cette méthode présente d'importantes limitations car elle ne permet pas un contrôle précis des distributions de taille. Afin d'obtenir un meilleur contrôle de la taille et de la morphologie, on peut utiliser d'autres méthodes physiques plus sophistiquées comme :

- La pulvérisation d'un matériau cible, par exemple à l'aide d'un plasma (pulvérisation cathodique), ou d'un faisceau laser intense (ablation laser). [3]
- Le chauffage à très haute température (évaporation thermique) d'un matériau de manière à ce que les atomes qui le constituent s'évaporent. Ensuite un refroidissement adéquat de ces vapeurs permet une agglomération en nanoparticules. [4]

En général, les méthodes physiques nécessitent un matériel coûteux pour un rendement en nanoparticules souvent très limité. Les nanoparticules ainsi synthétisées sont la plupart du temps déposées ou liées à un substrat.

➤ Méthodes chimiques :

Aujourd'hui un grand nombre de méthodes de synthèse par voie chimique sont disponibles et présentent l'avantage d'être en général simples à mettre en œuvre et d'être souvent quantitatives et peu coûteuses. Ces méthodes permettent d'obtenir des particules avec une distribution de tailles relativement étroite et de morphologies variées. Comme dans le cas de la voie physique, les nanoparticules peuvent être synthétisées sous deux formes : libres à l'état de poudre relativement facile à disperser dans un liquide ou un gel hôte, ou enrobées dans une matrice solide ou un polymère.

Nous citons ici deux méthodes chimiques parmi les plus utilisées :

a) Décomposition de précurseurs organométalliques :

L'utilisation de précurseurs organométalliques permet d'élaborer différents systèmes de nanoparticules. Le procédé repose sur la décomposition, dans un solvant organique judicieusement choisi, d'un composé organométallique, dans lequel le métal est généralement à bas degré d'oxydation. Ceci permet d'éviter l'emploi de réducteurs chimiques puissants qui engendrent souvent des impuretés qui s'adsorbent à la surface des particules et sont difficiles à éliminer. La décomposition est réalisée par élimination des ligands de coordination. Cette élimination se fait en général par chauffage. [5].

b) Voie radiolytique :

Le principe de la synthèse radiolytique des nanoparticules consiste à réduire des ions métalliques en solution au moyen d'espèces produites (en général des électrons) par radiolyse. Dans de telles solutions, les ions métalliques en solution sont en concentration suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas d'effet direct des rayonnements sur ces ions. La synthèse peut donc se décrire en deux parties (la radiolyse du solvant, et les réactions de réduction des ions métalliques par les espèces produites par radiolyse suivies par la coalescence des atomes produits). [6].

Les méthodes chimiques ont souvent un rendement bien supérieur à celui des méthodes physiques.

La préparation des Nanofluides doit tenir compte surtout d'une suspension stable et durable et une agglomération minimale des nanoparticules, et doit assurer qu'elles n'entrent pas en échange chimique avec le fluide de base.

Les liquides de base généralement utilisés dans la préparation des nanofluides sont ceux d'usage commun tels que l'eau, l'éthylène glycol, l'huile de moteur etc... Le tableau (I.1) regroupe une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base préparés par différents groupes de recherche.

Tableau I.1 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base [7] .

	Acétone	Eau	Ethylène glycol	Huile	Toluène	Décène	éthanol
<i>Ag</i>		x		x			
<i>AIN</i>							x
<i>Au</i>		x			x		
<i>Al₇₀Cu₃₀</i>			x				
<i>Al₂O₃</i>		x	x	x			
<i>C(diamant)</i>		x					
<i>C(graphite)</i>		x		x			
<i>C (NTC)</i>		x		x			
<i>C (fullerène)</i>				x	x		
<i>Cu</i>	x	x	x	x			
<i>CuO</i>		x	x				
<i>Fe</i>			x				
<i>SiC</i>		x					
<i>SiO₂</i>		x	x				
<i>TiO₂</i>		x	x				
<i>WO₃</i>			x				
<i>ZrO₂</i>		x					

I.4 Fabrication et préparation des nanofluides :

Il y a deux méthodes principales pour obtenir un nanofluide :

- Méthode en une seule étape :

La méthode en une seule étape consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base. Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains

nanofluides mais permet d'éviter l'agglomération et l'oxydation des nanoparticules. Un exemple de procédé consiste à condenser sous forme de nanoparticules une vapeur métallique dans un réacteur sur un film de liquide à basse tension de vapeur Figure (I.2).

- Méthode en deux étapes :

La méthode en deux étapes consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base Figure (I.3). Pour permettre une bonne dispersion, une forte action mécanique à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrasons est souvent nécessaire afin de briser les agglomérats. En outre, pour éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, on utilise des forces de répulsion électrostatique en chargeant la surface des particules en adaptant le pH. On peut également utiliser les forces de répulsion stériques à l'aide de molécules adsorbées ou greffées sur la surface.

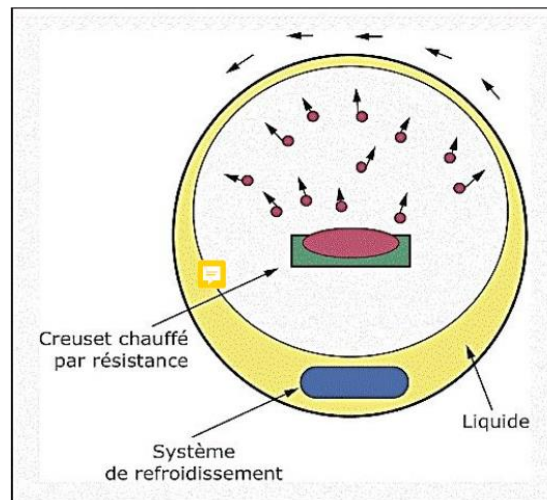


Figure I.2. Procédé de synthèse de nanofluides en une seule étape [7] .

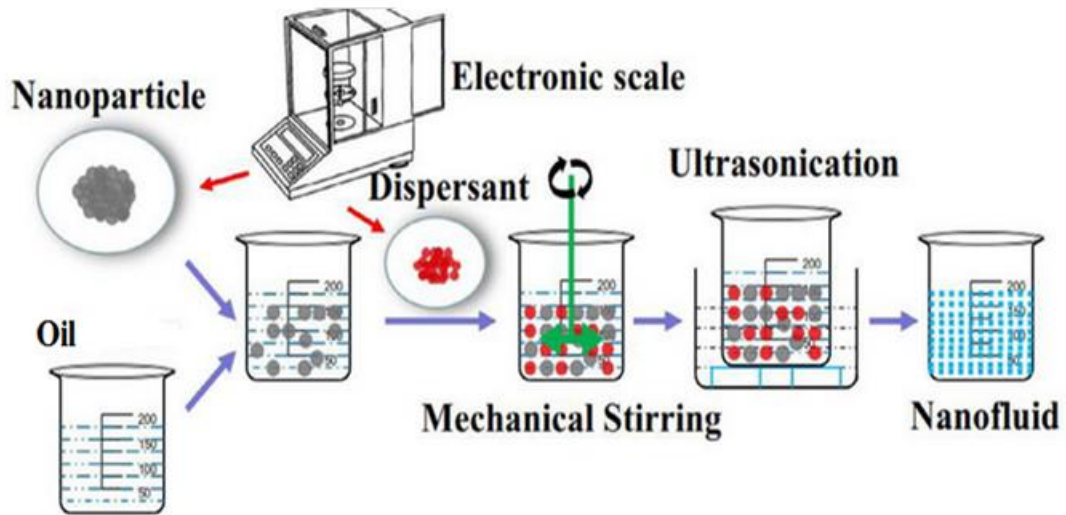


Figure I.3. Procédé de synthèse de nanofluide en deux étapes [8]

I.5 Propriétés thermophysiques des nanofluides :

Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et cinématique, capacité thermique massique, etc.) sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable sur cette déviation (le matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu). De nombreux groupes de recherche tentent de comprendre quels sont le ou les mécanismes à l'origine de telles différences mais aucune phénoménologie n'a pu être encore formulée de manière concise et satisfaisante.

I.5.1 La masse volumique :

Pour calculer la masse volumique d'un nanofluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique ϕ à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange.

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (I-1)$$

La fraction volumique des nanoparticules, notée ϕ désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + solide). La valeur de la fraction volumique varie de 0 (fluide de base pur) et 1 (entièrement nanoparticules). La relation est donnée comme suit:

$$\phi = \frac{\text{Volumesolide}}{\text{Volumetotaldunanofluide}} = \frac{V_s}{V_s + V_f}$$

On en déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \text{ (I-2)}$$

Où :

ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules solides.

I.5.2 La chaleur spécifique :

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

Pak et Cho. (1998) ont utilisé [9]:

$$(C_p)_{nf} = (1 - \phi)(C_p)_f + \phi(C_p)_s \text{ (I-3)}$$

Xuan et Roetzel (2000) ont utilisé [10]:

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \text{ (I-4)}$$

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

I.5.3 La conductivité thermique des nanofluides :

Etant donné que les nanoparticules à haute conductivité thermique en suspension dans le fluide de base qui a une faible conductivité thermique, augmentent remarquablement la conductivité thermique de nanofluides. Les chercheurs ont développé plusieurs modèles pour prédire l'estimation de la conductivité du nanofluide et de nombreuses expériences ont été menées pour comparer les données expérimentales avec ces modèles analytiques, constitués par des éléments très réguliers tels que les nanoparticules sphériques. Les modèles décrits dans la littérature sont des outils de prédictions développés, afin d'appréhender les mécanismes de transfert thermique au sein des nanofluides.

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

a) Modèle de Maxwell (1881) [11]

Maxwell a supposé que le fluide renferme plusieurs particules sphériques de même diamètre D_p . La formule de Maxwell est donnée par :

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f + k_s)} k_f \quad (I-5)$$

k_{nf} , k_f , k_s désignent respectivement les conductivités thermiques du nanofluide, du fluide de base et des particules solides.

b) Modèle de Hamilton-Crosser (1962)[12]

le modèle du 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) .

$$k_{nf} = \frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_s)\phi}{k_s + (n-1)k_f + (k_f - k_s)\phi} k_f \quad (\text{I-6})$$

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

$n = 3$ pour les particules sphériques et $n = 6$ pour les particules cylindriques.

Pour(ψ) = 1 (particules sphériques), le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell.

c) Modèle de Yu et Choi (2003) [13]

Ils ont proposé de modéliser les nanofluides 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.

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)(1 + \beta)^3 \phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)(1 + \beta)^3 \phi} k_f \quad (\text{I-7})$$

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

I.5.4 La viscosité dynamique :

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. La viscosité est une propriété importante de l'écoulement des fluides. La puissance de pompage, les pertes de charge dans un écoulement laminaire et le transfert de chaleur par convection dépendent directement de la viscosité des fluides.

Comme pour la conductivité thermique, la littérature contient plusieurs modèles théoriques développés pour calculer la viscosité dynamique des nanofluides en fonction d'un certain nombre de paramètres liés à la nature des nanoparticules, leur

taille, la température, etc. Cependant, souvent ces modèles sont élaborés pour des cas particuliers.

Généralement, tous les modèles existants découlent du modèle d'Einstein (1906)[14]. Einstein a été le premier à calculer la viscosité effective d'une suspension de solides sphériques à l'aide des équations hydrodynamiques phénoménologiques. Sa formule reposait sur l'hypothèse d'un fluide visqueux contenant des particules sphériques à une très faible fraction volumique ($\phi < 0.02$). La formule proposée est donnée ci-dessous:

$$\mu_{eff} = \mu_{fb}(1 + 2.5\phi) \quad (I-8)$$

où μ_{eff} et μ_{fb} dénotent respectivement la viscosité du nanofluide et la viscosité du fluide de base. ϕ est la fraction volumique des nanoparticules.

Cette formule montre une augmentation linéaire de la viscosité avec la concentration en volume de particules. Einstein a envisagé des suspensions sans interaction. Cette formule présente certaines limites, car elle ne prend pas en compte l'interaction particule-particule au sein de la solution et les concentrations élevées en particules. Brinkman (1952) [15] a étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques. Sa relation conduit à la relation d'Einstein pour les faibles fractions volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (I-9)$$

Ces deux premières relations n'intègrent pas les effets de mouvement Brownien ni la taille des nanoparticules en suspension.

Sept ans plus tard, Batchelor (1977) [16] modifia l'équation de viscosité d'Einstein en introduisant l'effet du mouvement Brownien. Le modèle a été développé en considérant une suspension isotrope de nanoparticules solides et sphériques. Son modèle est donné par :

$$\mu_{eff} = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2)\mu_{fb} \quad (I-10)$$

En effet, l'écoulement autour de chaque particule est influencé par la présence éventuelle d'autres particules à proximité et par les collisions entre particules. Ainsi, cela est corrigé par le terme ϕ^2 dans le modèle de Batchelor.

Les modèles étalés ci-dessus sont connus comme les modèles classiques de la viscosité des nanofluides. Les nouveaux modèles développés, par la suite, ont été élaborés en modifiant ces modèles classiques.

En fait, aucun modèle n'est capable de prédire avec exactitude la viscosité des nanofluides. Une large gamme de variations apparaît lors de la comparaison des données expérimentales avec les valeurs théoriques [17].

Nous donnons dans le tableau (I.3) le rapport de la viscosité d'un nanofluide (eau+ Al_2O_3) sur la viscosité du fluide de base en fonction de la fraction volumique ϕ variant de 0% à 4%, en utilisant les différents modèles d'Einstein [18], de Brinkman [19], de Batchelor [20] et les Corrélation de Maiga et al. [21].

Tableau I.2 : Rapport des viscosités du nanofluide (Al_2O_3 +eau) obtenus à partir des différents modèles étudiés [22].

$\phi\%$	Einstein	Brinkman	Batchelor	Corrélation de Maiga et al
0	1	1	1	1
1	1.0250	1.0254	1.026	1.10
2	1.0500	1.0518	1.0525	1.21
3	1.0750	1.0791	1.0806	1.32
4	1.1000	1.1074	1.1099	1.48

I.6 Domaines d'applications des nanofluides :

Les nanofluides peuvent être employés pour améliorer le transfert de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques Fig.(I.5). Dans cette section, quelques exemples d'applications seront présentés tel que le transport, la micro-électronique, la défense, le nucléaire, l'espace, et la biomédicale.

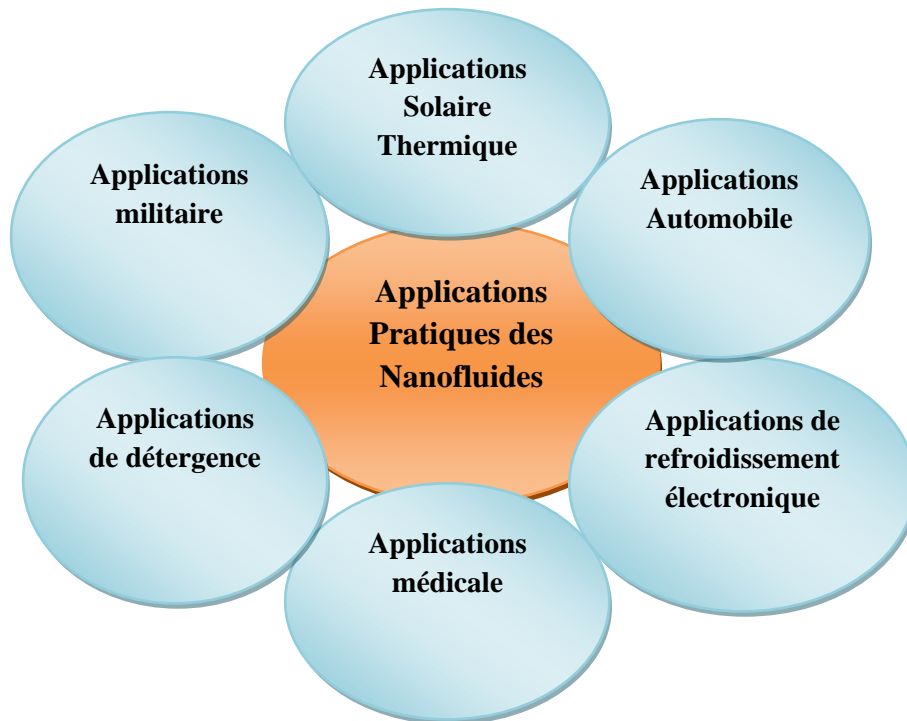


Figure I.4. Domaines d'applications des nanofluides

a) Applications électroniques : En raison d'une génération de chaleur plus élevée dans les puces et les composants de circuits électroniques. L'évacuation de cette chaleur aussi élevée de ces appareils compacts est plus que nécessaire. La chaleur peut être évacuée par deux méthodes : en optimisant la conception du système de refroidissement et en utilisant un fluides à haut pouvoir de dissipation thermique. Ici, les nanofluides jouent le rôle des fluides à capacité calorifique plus élevée que les fluides conventionnels de refroidissement. Les nanofluides ont une conductivité thermique plus élevée par rapport à ceux des fluides de base, comme le prouvent de nombreux recherches.

b) Transport : Les nanofluides ont la capacité de faire progresser les systèmes de refroidissement des moteurs et des pièces génératrices de chaleur des automobiles. Les nanofluides augmentent le taux de transfert de chaleur et réduisent ainsi le poids et la complexité des systèmes de refroidissement. Cela aide à créer des conceptions

compactes pour la même puissance avec des radiateurs plus légers. Il est bénéfique pour des performances élevées et une économie de carburant élevée.

c) Chauffage des bâtiments et réduction de la pollution : Kulkarni et al [23] ont évalué le chauffage des bâtiments en région froide avec l'utilisation des nanofluides. Dans des régions plus froides, un mélange d'éthylène glycol et de l'eau en différentes proportions est utilisée comme fluide caloporteur. L'analyse de Kulkarni et al [23] a montré qu'en utilisant les nanofluides dans l'échangeur de chaleur, pourrait réduire la masse et le taux du débit volumétrique, ce qui se traduit par une économie globale de puissance de pompage. Les nanofluides demandent des volumes plus petits et des systèmes de chauffage compacts capables de fournir la même quantité d'énergie que les grands systèmes.

d) Systèmes de refroidissement nucléaires : Des chercheurs de l'Institut de Massachusetts de Technologie explorent les applications des nanofluides en science nucléaire. Ils utilisent le nanofluide : - comme liquide de refroidissement pour les conditions d'urgence pour le refroidissement du cœur, - comme réfrigérant pour la rétention en cuve du cœur en fusion lors d'accidents graves dans les réacteurs à eau légère de forte puissance [24].

e) Espace et défense : La restriction de l'espace, de l'énergie et du poids dans les stations spatiales et dans les avions génère le besoin d'un système de refroidissement très efficace qui a une capacité de flux de chaleur élevée. Cela présente une vision pour un poids plus léger des systèmes de refroidissement grâce à des conceptions compactes et simples d'échangeurs de chaleur, ce qui rend en outre les voyages dans l'espace moins chers. La capacité de flux de chaleur critique élevée rend les nanofluides capable d'être utilisé dans des systèmes militaires tels que dans les sous-marins, les lasers à diode haute puissance, etc. Ainsi les nanofluides ont le potentiel d'être utilisés dans les domaines où les composants doivent être plus légers.

f) Absorption solaire : L'énergie solaire est la meilleure source d'énergie non conventionnelle disponible en abondance. Le capteur solaire à absorption directe est une technologie bien établie. Mais le rendement est très faible en raison de la faible capacité d'absorption du fluide collecteur. Récemment, cette technologie a été mise en commun avec la technologie nanofluidique. Otanicar et al [25] ont réalisé des expériences sur un capteur solaire à absorption directe avec des nanofluides comme

fluide de travail et ont rapporté une augmentation de 5% de l'efficacité des capteurs solaires thermiques.

g) Autres Applications : Parallèlement à ces applications majeures des nanofluides, on peut citer d'autres applications dans différents domaines, tels que : - la livraison de nanomédicaments, - dans des microréacteurs, - comme liquides de frein pour véhicules, - pile à combustible microbienne à base de nanofluides, - étanchéité magnétique, - réduction de friction, etc.

I.7 . Rhéologie des Nanofluides :

I.7.1 Introduction :

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

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

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

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

I.7.2 Grandeurs rhéologiques

Pour définir les principales grandeurs rhéologiques, considérant l'écoulement laminaire d'un fluide entre deux plateaux parallèles, dont l'un se déplace à une vitesse constante et l'autre est stationnaire Fig.(I.5).

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

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

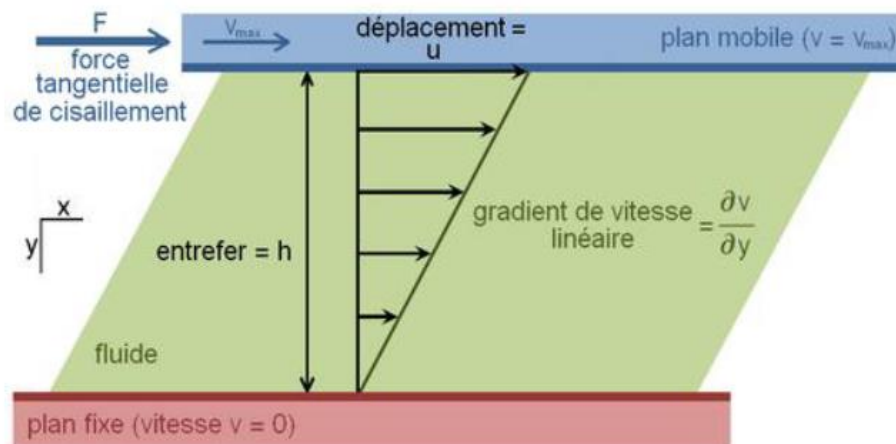


Figure I.5.: Schéma de l'écoulement de cisaillement

I.7.2.1- Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement (notée τ) est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche : elles sont appelées force de cisaillement Fig.(I.6).

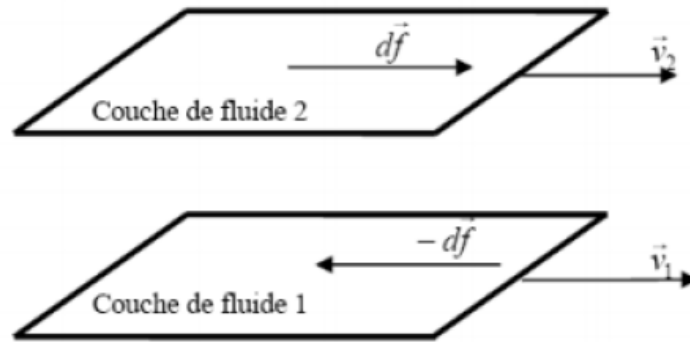


Figure I.6. Forces agissant sur deux éléments de couches voisines

En supposant que la couche (1) est animée d'une vitesse v_1 supérieure à la vitesse v_2 de la couche (2), la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement dF parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). La couche (2) exerce pour sa part sur la couche (1), une force de cisaillement $-dF$ tendant à la freiner. En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface, on définit la contrainte de cisaillement τ (équation II.1) :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (\text{I.11})$$

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

I.7.2.2- Taux de cisaillement

La déformation et la vitesse de cisaillement sont les grandeurs cinématiques fondamentales en rhéologie. La définition de la déformation de cisaillement est présentée dans le cas particulier le plus simple d'un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane. Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile Fig.(I.8).

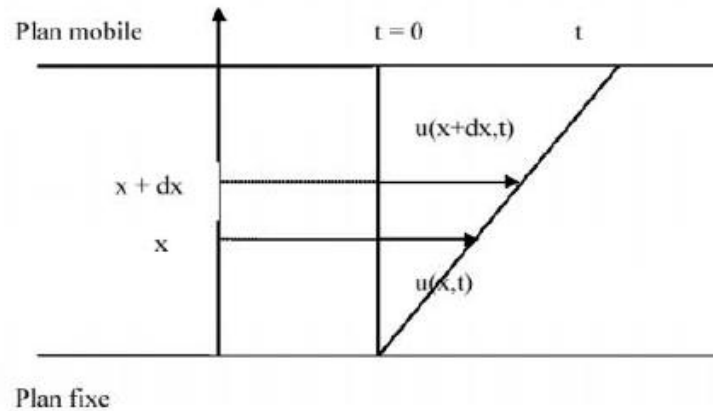


Figure I.7. Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.

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

$$\gamma = \frac{du(x,t)}{dx} \text{ (I.12)}$$

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

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

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \text{ (I.13)}$$

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

I.7.2.3- La Viscosité :

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

L'équation correspondante s'écrit :

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{du}{dx}$$

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \text{ (I.14)}$$

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

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

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ (I.15)}$$

L'unité de la viscosité cinématique est exprimée en m^2/s dans le système SI, dans le système cgs, on utilise le Stoke (St) où $1 m^2/s = 106 \text{ cSt}$.

Dans le tableau (I.3), on trouve à titre d'exemple une comparaison entre les valeurs des viscosités dynamiques et cinématiques de quelques fluides.

Tableau I.3. Valeurs de viscosité de fluides (à 20°C et à pression atmosphérique normale) [26]

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

I.7.3 Modèles rhéologiques

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

I.7.3.1- Fluides newtoniens :

Le comportement d'un fluide newtonien est caractérisé par une dépendance linéaire entre les contraintes et les vitesses de déformations. Le coefficient de proportionnalité étant la viscosité dynamique. Celle-ci est par ailleurs indépendante du taux de cisaillement et constante en fonction du temps Fig.(I.8). La majorité des fluides rencontrés dans la nature sont newtoniens. L'eau, l'air et les huiles de faible viscosité en sont les exemples les plus représentatifs.

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

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \text{ (I.16)}$$

τ : Contrainte de cisaillement [Pa].

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

η : Viscosité dynamique du fluide [Pa.s]

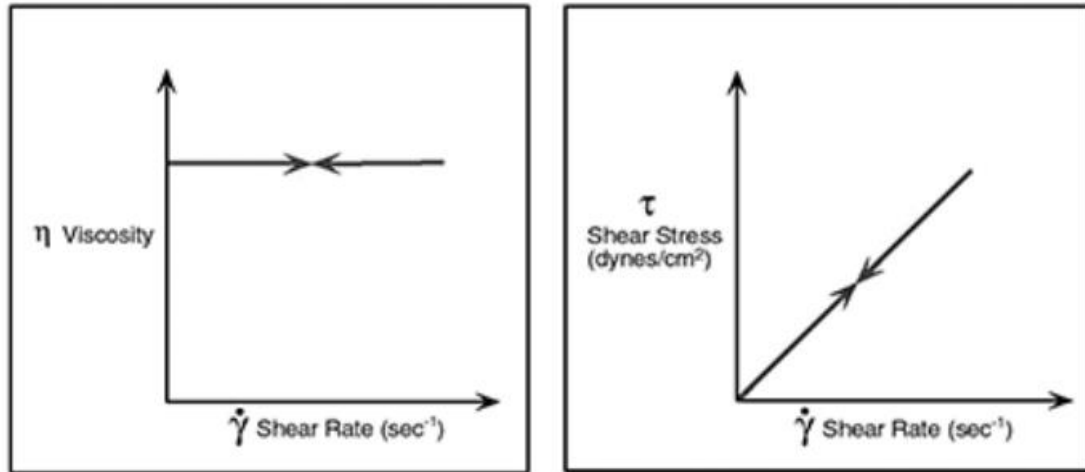


Figure I.8. Viscosité d'un liquide Newtonien

I.7.3.2- Fluides non newtoniens au comportement indépendant du temps :

Dans la famille des fluides non newtoniens, on rencontre plusieurs types de comportements, dont les principaux sont représentés sur la Fig.(I.9) qui décrit l'allure des différentes courbes d'écoulement (contrainte en fonction du taux de cisaillement).

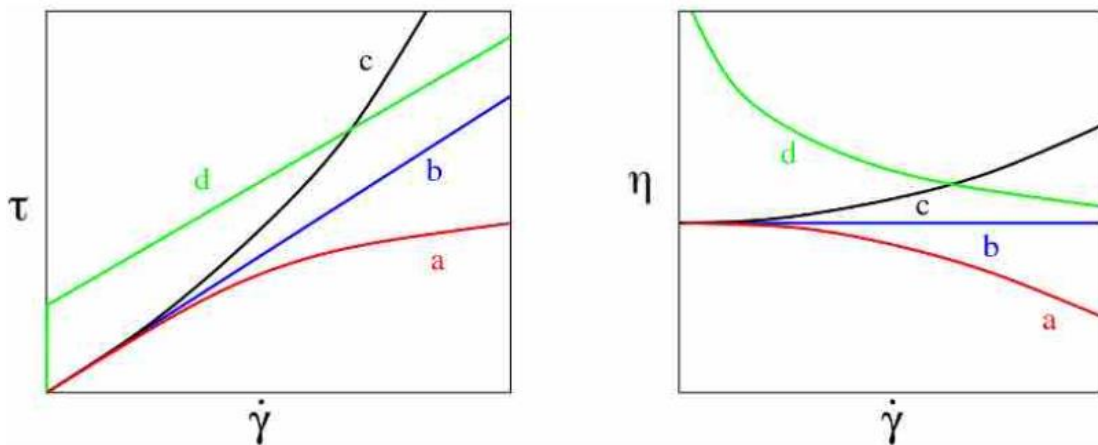


Figure I.9 : Rhéogrammes des fluides (a) rhéo-fluidifiant, (b) newtonien, (c) rhéo-épaississants et (d) à seuil

a) Fluides rhéofluidifiants :

Ces fluides ont une viscosité qui diminue lorsque le taux de cisaillement augmente. De nombreux fluides montrent ce comportement : sang, shampoing,

peintures ou encore solutions de polymères. Pour les solutions de polymères, ce comportement est attribuable à la séparation de macromolécules enchevêtrées puis à leur alignement dans le sens de l'écoulement au fur et à mesure de l'augmentation du taux de cisaillement. Dans les suspensions la diminution de la viscosité provient de la disparition progressive des structures organisées. L'allure de la courbe d'écoulement est représentée sur la Fig.(I.9).

b) Fluides rhéoépaississants :

Ce sont des fluides dont la viscosité croît avec le taux de cisaillement.

Le rhéoépaississement est beaucoup plus rarement observé que la rhéofluidification. Toutefois certaines suspensions concentrées (amidon de maïs par exemple) et le sable mouillé ont un comportement rhéoépaississant. Un fluide peut être rhéoépaississant pour une certaine gamme de taux de cisaillement, et rhéofluidifiant voire newtonien pour d'autres gammes. L'allure de la courbe d'écoulement est représentée sur la Fig.(I.9). Parmi les fluides qui ont un comportement rhéoépaississant, on trouve les suspensions à concentration élevée (> 50%) et le mélange maïzena/eau.

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

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \text{(I.17)}$$

Avec :

τ : Contrainte de cisaillement en Pa

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

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

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

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

On a ainsi :

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \text{(I-18)}$$

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

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

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

De préférence et pour une bonne observation des paramètres de l'équation rhéologique d'état, on trace les rhéogrammes expérimentaux dans les coordonnées "Ln-Ln", c'est-à-dire la régression linéaire, afin de transformer la courbe en droite, voir Fig.(I.11).

Lorsqu'on fait le logarithme de l'équation (II.7), on aura :

$$\ln(\tau) = \ln(K) + n \ln(\dot{\gamma}) \quad (\text{I-19})$$

L'indice rhéologique (n) représente donc la pente de la droite et l'indice de consistance (K) est donné par le point de rencontre de la courbe avec l'axe des ordonnées. [12].

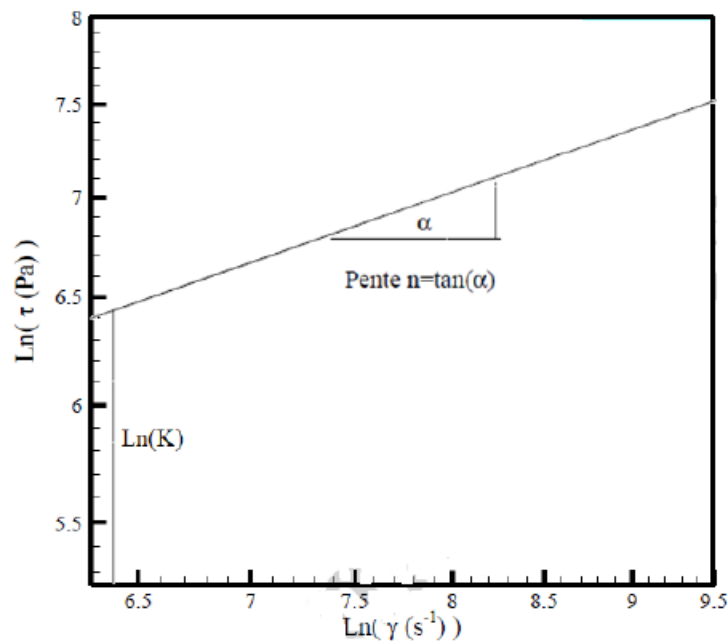


Figure I.10: Diagramme logarithmique contrainte de cisaillement - taux de cisaillement

c) Fluides à seuil :

Ces fluides ne s'écoulent qu'à partir d'une certaine contrainte, dite contrainte seuil (τ_0). En dessous de celle-ci, ils se comportent comme des solides et au-delà ils s'écoulent comme un fluide newtonien ou rhéofluidifiant. Cette propriété se rencontre dans certaines solutions de polymères et suspensions très concentrées, et dans la vie courante avec le dentifrice, le yaourt, le ketchup ou encore les argiles (laponite et bentonite par exemple) et les boues de forage. Ce comportement peut être interprété par la présence d'agrégats dans le matériau ou de gels qui subsistent jusqu'à la contrainte seuil. Pour une suspension concentrée, un réseau d'interactions peut en effet exister et doit être brisé pour provoquer l'écoulement de la suspension.

Les deux modèles les plus utilisés pour caractériser les fluides à seuils sont, respectivement, le modèle de Bingham (1922) et le modèle de Herschel-Bulkley (1926) Fig.(I.12).

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{I.20})$$

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.21})$$

Où μ_{pl} est la viscosité plastique, k la consistance du fluide et n l'indice d'écoulement. Ces deux modèles permettent de représenter le comportement rhéologique de beaucoup de fluides au-delà de la contrainte seuil. [27].

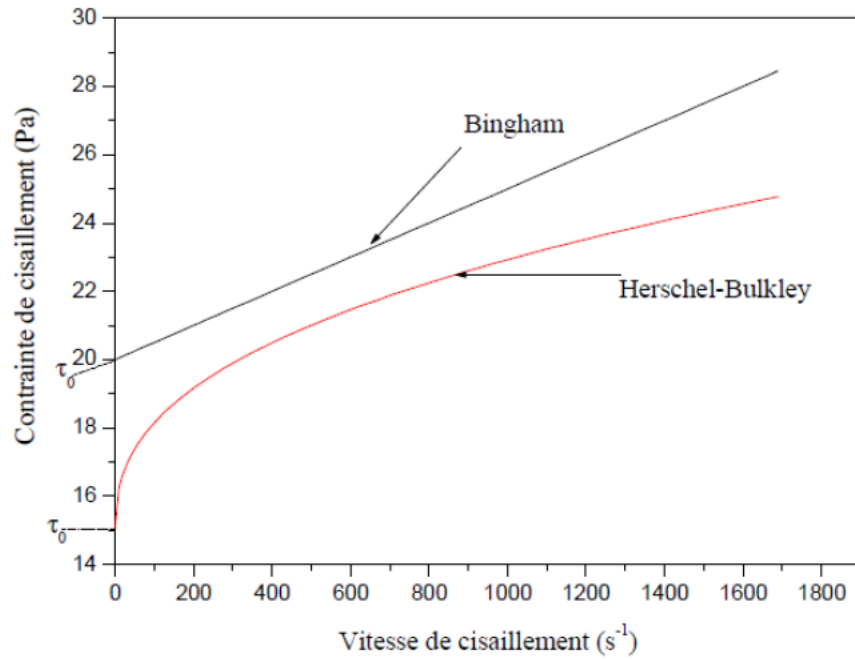


Figure I.11: Courbe d'écoulement d'un fluide à seuil

I.7.3.3- Fluides non newtoniens au comportement dépendant du temps :

a) La thixotropie :

Les fluides thixotropes ont une viscosité qui diminue avec le temps quand on leur applique une contrainte constante. Après suppression de cette contrainte on ne retrouve la viscosité initiale qu'après un certain temps plus ou moins long Fig.(I.13). C'est un phénomène réversible. Plusieurs matériaux ont un comportement thixotrope tels que : la moutarde, le ketchup, le yaourt, les peintures, les boues de forage, la pate de gypse et certains polymères.

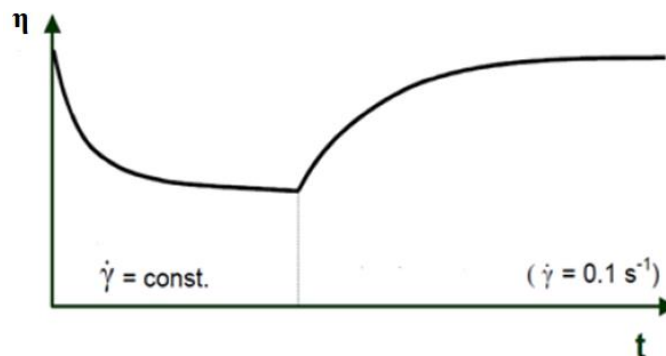


Figure I.12 : courbe viscosité-temps d'un matériau thixotrope

b) L'Antithixotropie :

Les fluides antihixotropes (aussi appelés fluides rhéopexes) sont des fluides qui deviennent de plus en plus solides au fur et à mesure qu'on leur applique une contrainte de cisaillement. Ils reviennent généralement à leur état initial (moins visqueux) après un temps variable lorsque la contrainte de cisaillement n'est plus présente Fig.(I.14).

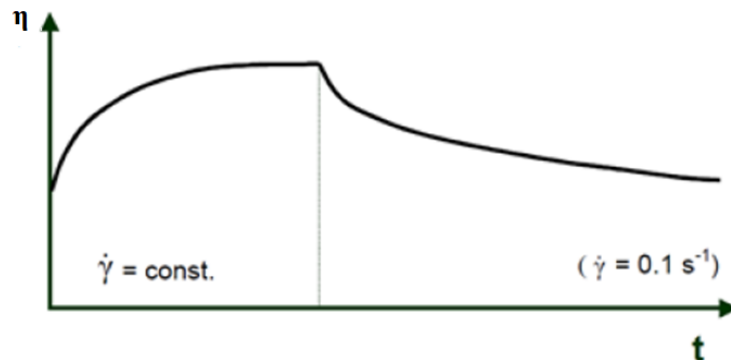


Figure I.13: courbe viscosité-temps d'un matériau rhéopexique

II.7.3.4 - Fluides viscoélastiques :

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

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

$$\tau = \tau_{\text{élast}} + \tau_{\text{visq}} = E\gamma + \mu\dot{\gamma} \quad (\text{I.22})$$

Où E est un module d'élasticité et γ est la déformation et μ est la viscosité.

I.7.4- Les rhéomètres :

I.7.4.1- Présentation :

Les rhéomètres permettent d'obtenir des rhéogrammes qui servent à décrire les propriétés d'écoulement d'un matériau. La représentation la plus courante consiste à exprimer la variation de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$. Il existe au moins deux grandes familles de rhéomètres : les rhéomètres rotatifs et les rhéomètres capillaires.

I.7.4.2- Les rhéomètres rotatifs :

En rhéomètre rotatif, le fluide est soumis à un cisaillement entre deux surfaces, l'une en rotation autour de son axe (le rotor) et l'autre immobile (le stator). Il existe trois géométries rotor/stator différentes : plan-plan, cône-plan ou bien encore à cylindres coaxiaux (plus communément appelée géométrie de Couette) Fig.(I.15). Les grandeurs rhéologiques accessibles sont d'une part le taux de cisaillement déterminé à partir de la géométrie de la surface et de la vitesse de rotation, et d'autre part, la contrainte de cisaillement mesurée à partir du couple à appliquer pour maintenir le mouvement du rotor. Ces deux grandeurs permettent d'établir le rhéogramme $\tau = f(\dot{\gamma})$, signature de l'écoulement du matériau, et d'en déduire la viscosité dynamique par exemple.

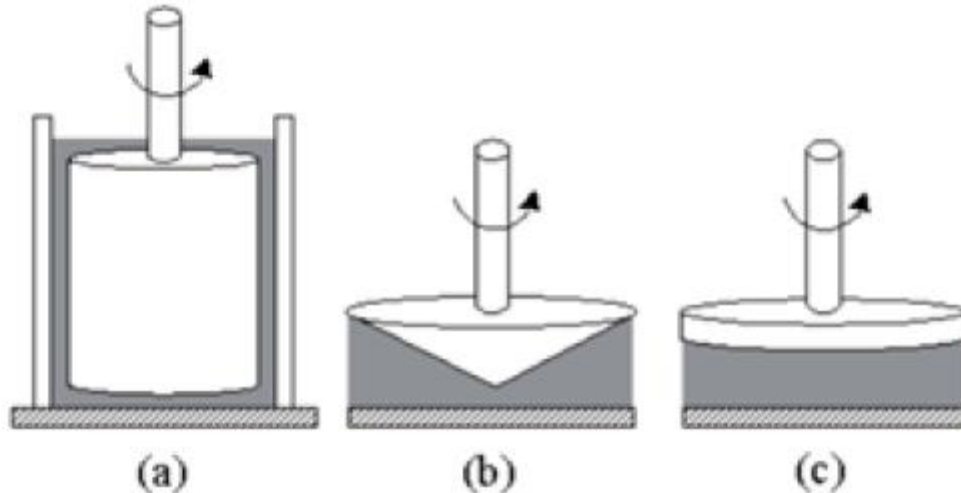


Figure I.14 : Différentes géométries de rhéomètres rotatifs : (a) Couette (b) Cône-Plan (c) Plan-Plan.

I.7.5. Paramètres influençant la rhéologie des nanofluides :

I.7.5.1 Influence de la concentration volumique :

La concentration volumique est un facteur qui affecte directement la viscosité des nanofluides. De nombreux chercheurs ont montré que la viscosité des nanofluides augmente avec l'augmentation des concentrations de particules [28–31]. Sundar et al. [32] et Abareishi et al. [33] ont constaté que l'amélioration de la viscosité est due à la concentration volumique des particules. Hung et Chou [34] ont mesuré la viscosité du nanofluide de MWCNT et ont étudié que les performances de la suspension étaient influencées par les concentrations d'additifs des (MWCNT). Rashin et Hemalatha [35] ont étudié la viscosité sur un nouveau nanofluide d'oxyde de cuivre et d'huile de coco de diverses concentrations préparé par une méthode en deux étapes. Namburu et al. [36] ont exprimé un résultat selon lequel la viscosité des nanofluides augmente en augmentant la concentration volumique. Saedinia et al. [37] ont étudié la viscosité de nanofluides d'huile à base de CuO stables avec différentes fractions de poids de particules de 0.2 à 2% à différentes températures. Ces nanofluides présentent un comportement newtonien pour toutes les charges et températures de particules. Murshed et al. [38] ont mesuré la viscosité des nanofluides avec différentes fractions volumiques de nanoparticules et se sont révélées nettement plus élevées que les fluides de base. Alors que [39, 40] ont montré une réduction de viscosité avec l'ajout de nanoparticules.

I.7.5.2 Influence du taux de cisaillement :

Le paramètre qui peut influencer la viscosité dans les nanofluides non newtoniens est le taux de cisaillement. Ce paramètre joue un rôle important pour faire la distinction entre les nanofluides newtoniens et non newtoniens. Les interactions particule-particule deviennent plus faibles et sont même décomposées avec l'augmentation du taux de cisaillement et les nanofluides présentent un comportement newtonien. Yu et al. [41] ont examiné l'effet du taux de cisaillement sur la viscosité de nanofluides à base d'EG contenant des nanoparticules de ZnO. Les résultats ont montré que avec de faibles concentrations volumiques ($\phi \leq 0,02$) les nanofluides ZnO-EG présentent des comportements newtoniens. Pour des concentrations volumiques plus élevées ($\phi \geq 0,03$), les nanofluides ZnO-EG présentent les comportements non newtoniens. Abareshi et al. [42] ont remarqué que le nanofluide Fe_2O_3 -glycérol présentait un comportement de fluidification par cisaillement.

I.7.5.3 Influence de la température :

La température est le paramètre le plus critique et le plus influençant sur la rhéologie des nanofluides. La tendance globale indique une baisse de la viscosité avec l'augmentation de la température. Quand la température augmente, l'attraction intermoléculaire entre les nanoparticules et leur fluides de base s'affaiblit [43]. Par conséquent, la viscosité des nanofluides diminue avec l'augmentation de la température. Suganthi et Rajan [44] ont étudié expérimentalement des nanofluides composés de nanoparticules de ZnO dispersées dans l'eau. Les résultats ont montré que la viscosité relative diminue avec l'augmentation de la température (35 à 55 °C). Turgut et al. [45] ont étudié la conductivité thermique et la viscosité de l'eau désionisée au TiO₂ pour la température de 13 à 55 °C et les résultats ont prouvé une réduction de la viscosité avec la température.

I.8 Etat de l'art :

Nous allons présenter dans ce qui suit les principaux travaux expérimentaux réalisés avec trois nanoparticules d'oxyde, à savoir l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), l'oxyde de fer(III) (Fe_2O_3) et l'oxyde de zinc (ZnO).

I.8.1 Nanoparticules d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) :

Les Nanoparticules d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) ont été étudiées, dans plusieurs travaux de recherche. M.H. Esfe, et al [46] ont mené une étude expérimentale sur la viscosité de l'huile de moteur à l'alumine. Ils ont étudiés l'effet de la température et de la concentration de nanoparticules sur la viscosité. Les résultats de l'expérience à différents taux de cisaillement ont montré que tous les échantillons présentent un comportement newtonien, la viscosité du nanofluide augmente avec la fraction volumique solide et diminue avec l'augmentation de la température et que les modèles théoriques ne permettaient pas de prédire les valeurs correctes de la viscosité des nanofluides pour toutes les fractions volumiques solides.

M. Hemmat Esfe et al[47] ont réalisé une étude expérimentale sur le comportement non newtonien d'un nano-lubrifiant hybride Al_2O_3 -MWCNT / 5W50. Les résultats ont montré un comportement non newtonien du nanofluide et du fluide de base et suite à l'augmentation de la température l'indice de consistance a diminué alors que l'indice de la loi de puissance a augmenté et à des températures plus élevées, le comportement non newtonien du nano-lubrifiant hybride est diminué.

Yiamsawas et al. [48] ont mesuré la viscosité du nanofluide Al_2O_3 / eau à des concentrations élevées et à des températures élevées. La gamme de fraction volumique des nanoparticules variait de 1% à 8% alors que la température se situait entre 15 ° C et 60 ° C. Ils ont déclaré que la viscosité diminue avec une augmentation de la température.

Chandrasekar et al. [49] ont mené des études expérimentales dont le but était la détermination de la viscosité effective du nanofluide Al_2O_3 / H_2O . Les résultats ont montré que La viscosité des nanofluides augmente avec la fraction volumique des nanoparticules. Les modèles classiques sont développés pour prédire la viscosité des

nanofluides, ce qui montre un accord pratiquement acceptable avec les résultats expérimentaux.

Massuda et al. En 1993 [50] . En dispersant des nanoparticules (Al_2O_3) dans l'eau dont la taille des nanoparticules est de diamètre 13nm. Ils ont obtenu une amélioration de la conductivité thermique de 30% pour une fraction volumique $\phi = 4.3\%$.

En 2003 Das et al. [51] furent les premiers à étudier l'influence de la température sur l'accroissement de la conductivité thermique des nanofluides. Ils ont constaté une augmentation de la conductivité thermique lorsque la température varie de 21°C à 51°C pour deux nanofluides (Al_2O_3 +eau) et (CuO +eau). Les valeurs de diamètre des particules sont de 38,4nm pour (Al_2O_3) et de 28.6nm pour CuO . Les résultats expérimentaux montrent que la conductivité thermique augmente linéairement avec l'augmentation de la température et dépend de la fraction volumique des nanoparticules dans l'eau.

Xie et al. [52] ont examiné l'influence du Ph de la solution fluide de base et des nanoparticules de différentes tailles sur l'amélioration de la conductivité thermique du nanofluide et ce pour des nanoparticules (Al_2O_3) dispersées dans l'eau, l'éthylène glycol et l'huile. Ils ont montré que l'amélioration de la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de Ph.

I.8.2 Nanoparticules d'oxyde de fer(III) (Fe_2O_3) :

I. colla et al [53] ont mené une étude expérimentale sur des nanofluides à base d'eau contenant de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) à des concentrations comprises entre 5 et 20 % en masse. Il a été constaté que la conductivité thermique de ces nanofluides s'améliorait avec la température et la concentration des particules. Les effets de la température et de la concentration de nanoparticules sur la viscosité ont été analysés, obtenant une augmentation significative par rapport à l'eau. Tous les fluides ont présenté un comportement newtonien. Les valeurs expérimentales ont été comparées à certains modèles théoriques pour la conductivité thermique et la viscosité dynamique.

N.I.Zouli et al [54] ont développé une sonde de transfert de chaleur local qui peut mesurer le coefficient de transfert de chaleur pour étudier l'effet du nanofluide avec différentes concentrations et tailles de nanoparticules sur le

coefficient de transfert de chaleur local dans une configuration expérimentale à effet séparé développée. Des nanoparticules d'oxyde de fer (Fe_2O_3) ont été utilisées comme nanofluides circulant dans la section d'essai. Les tailles des nanoparticules de Fe_2O_3 variaient entre 20 et 40 nm. Les concentrations pour les différentes tailles de nanoparticules étaient comprises entre 0 et 0,09 % en volume. Les résultats montrent que l'utilisation de nanoparticules aqueuses de Fe_2O_3 peut améliorer de manière significative le coefficient de transfert de chaleur en régime d'écoulement turbulent.

Nishant kumar et al. [55] ont étudié l'effet des nanoparticules de Fe_2O_3 sur la conductivité thermique des fluides de base comme l'éthylène glycol et l'eau. La mesure de la conductivité thermique a été effectuée pour différentes concentrations et températures. À mesure que la concentration des nanoparticules augmentait, il y avait une amélioration significative de la conductivité thermique et du transfert de chaleur global en raison d'une plus grande interaction entre les particules. Il a également été observé qu'il y avait une amélioration de la conductivité thermique du fluide de base à mesure que la température augmentait.

I.8.3 Nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO) :

Li et al. [56] ont préparé des nanofluides à base d'éthylène glycol (EG) bien dispersés contenant des nanoparticules de ZnO avec différentes fractions de masse comprises entre 1,75% et 10,5% par une méthode typique en deux étapes. Les résultats expérimentaux ont montré que la viscosité augmente avec l'augmentation de la concentration de nanoparticules ZnO et diminue quand la température augmente.

Jeong et al. [57] ont étudié expérimentalement la viscosité de nanofluides de ZnO avec des formes de nanoparticules de forme presque sphérique et rectangulaire, sous différentes fractions volumiques de nanoparticules de 0,05 à 5,0 %. Leurs résultats indiquent que la viscosité des nanofluides augmente de 5,3 à 68,6% avec des augmentations de la concentration en volume et par rapport au fluide de base (eau). De plus, l'amélioration de la viscosité des nanoparticules de forme presque rectangulaire s'est avérée être supérieure à 7,7% plutôt que les nanoparticules sphériques. La forme des particules a un effet significatif sur l'amélioration de la viscosité. Asadi et Asadi [58] ont mené une étude expérimentale sur le comportement

rhéologique du nano-lubrifiant à base d'huile de moteur MWCNT / ZnO. Leurs résultats ont révélé que la viscosité dynamique du nano-lubrifiant diminue à mesure que la température augmente. M.H. Esfe et al[59] ont étudié, le comportement rhéologique du nano-lubrifiant ZnO / 10W40 par une approche expérimentale. Il a été révélé que les huiles de base et les nano-lubrifiants sont des fluides non newtoniens qui présentent un comportement rhéofluidifiant. La sensibilité de la viscosité à l'augmentation de la fraction volumique solide a été calculée par une nouvelle corrélation qui a été proposée en termes de fraction volumique solide et de température.

I.9 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons donné dans un premier temps une description générale des nanofluides (synthèse, caractérisation, production et applications). Les propriétés thermophysiques des nanofluides et les différents modèles développés pour ces propriétés sont présentés.

Une partie sur la rhéologie est développée, les principaux grandeurs et modèles rhéologiques sont définis. On a mis en évidence les facteurs qui influencent le comportement rhéologique des nanofluides à savoir : la fraction volumique, le taux de cisaillement et la température.

Une analyse des travaux expérimentaux antérieurs concernant trois nanoparticules d'oxyde est détaillées. A travers cette analyse, on a constaté que les résultats varient d'une publication à une autre et d'un nanofluide à un autre. Les principaux paramètres qui influent sur la rhéologie sont bien identifiés. La variation de la viscosité des nanofluides a été examinée en fonction du taux de cisaillement, de la température et de la concentration volumique. La comparaison entre les comportements rhéologiques de ces nanofluides devient plus que nécessaire.

Dans cet objectif, le chapitre suivant expose en détails, la méthode de préparation des nanofluides. Les essais rhéologiques sont détaillés et la viscosité dynamique de ces nanofluides est comparée sous différentes conditions.

CHAPITRE -II-

Matériaux et Dispositifs Expérimentaux

II.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés pour la fabrication des nanolubrifiants à savoir : les nanoparticules et le fluide de base. La procédure de préparation de ces nanolubrifiants est ainsi présentée. Une description du dispositif expérimental : le rhéomètre et ces accessoire est détaillée. Enfin les étapes de déroulement des essais est mentionné.

II.2 Préparation des Nanofluides :

II.2.1 Présentation des Nanoparticules :

II.2.1.1 L'oxyde de fer (Fe_2O_3) :

L'oxyde de fer est un composé inorganique également connu sous le nom d'hématite. Il est naturellement présent dans les roches. Il est obtenu à partir de l'oxydation du fer. Il est important dans les activités biologiques. L'oxyde de fer est soluble dans les acides forts comme l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique et insoluble dans l'eau. Le pH de l'oxyde de fer est de 7. Il est de couleur ocre à rouille sous forme pulvérulente mais grise à noire sous forme cristallisée Fig.(II.1). Les caractéristiques du nanoparticule Fe_2O_3 sont illustrés dans le tableau (II.1).



Figure II.1 : Nanoparticules d'oxyde de fer

Tableau II.1 : caractéristiques du nanoparticule Fe_2O_3

<i>Caractéristiques</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Formule</i>	Fe_2O_3
<i>Pureté</i>	85%
<i>Taille moyenne des particules (nm)</i>	58
<i>couleur</i>	Brique rouge
<i>Masse molaire</i>	159.688±0.005 g/mol Fe 69.94 %, O 30.06 %
<i>Température de fusion</i>	1565 °C (décomposition)
<i>Solubilité</i>	Dans l'eau : nulle
<i>Masse volumique</i>	5240 kg.m ⁻³
<i>Éléments d'impuretés</i>	Pb 0,01% ; Cl 0,01% ; SO ₄ 0,05%

II.2.1.2 L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) :

L'alumine est le deuxième oxyde métallique le plus abondant de la croûte terrestre après la silice. Elle se présente sous la forme d'une poudre blanche très stable Fig. (II.2). L'alumine est insoluble dans tous les composés chimiques courants et peu conductrice d'électricité. Elle présente une température de fusion élevée, légèrement supérieure à 2 000 °C. Les caractéristiques du nanoparticule Al_2O_3 sont illustrées dans le tableau (II.2).

**Figure II.2:** Nanoparticules d'oxyde d'aluminium ou alumine

Tableau II.2 : Caractéristiques du nanoparticule Al_2O_3

<i>Caractéristiques</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Formule</i>	Al_2O_3
<i>pureté</i>	$\geq 98\%$
<i>Taille moyenne des particules (nm)</i>	≤ 58
<i>couleur</i>	blanche
<i>Masse molaire</i>	101.9613 \pm 0.0009 g/mol Al 52.93 %, O 47.07 %
<i>Température de fusion</i>	2050 °C (décomposition)
<i>Température d'ébullition</i>	2980 °C
<i>Solubilité</i>	Insoluble dans les solvants organiques non polaires, l'éther diéthyliques, l'éthanol (95%), l'eau
<i>Masse volumique</i>	3.97 g.cm ⁻³ à 20 °C
<i>pression de vapeur saturante</i>	133.3 Pa à 2158 °C
<i>Conductivité thermique</i>	36.0 W. m ⁻¹ .K ⁻¹ à 26 °C 10.9 W. m ⁻¹ .K ⁻¹ à 500 °C 6.2 W. m ⁻¹ .K ⁻¹ à 1000 °C

II.2.1.3 L'oxyde de zinc (ZnO) :

L'oxyde de zinc est produit à partir de vapeur de zinc grâce à laquelle on obtient des particules de petite taille Fig. (II.3). Ces particules donnent aux écrans solaires leur couleur blanche. Ses applications depuis lors se sont étendues. Aujourd'hui, on le retrouve dans les pharmacies et en cosmétique pour ses nombreuses propriétés. les caractéristiques du nanoparticule ZnO sont illustrés dans le tableau (II.3).



Figure II.3 : Nanoparticules d'oxyde de zinc

Tableau II.3 : caractéristiques du nanoparticule **ZnO**

<i>caractéristiques</i>	<i>valeurs</i>
<i>Formule</i>	ZnO
Pureté	≥99%
Taille moyenne des particules (nm)	60
<i>Couleur</i>	blanche
<i>Masse molaire</i>	81.38±0.02 g/mol O 19.66 %, Zn 80.36 %
<i>Température de fusion</i>	Décomposition du cristal à 1975 °C, décomposition du corps amorphe moins stable au dessus de 1800 °C.
<i>Solubilité</i>	Très faible, quasi nulle dans l'eau pure. Soluble dans l'acide acétique dilue, les acides minéraux forts, les alcalis forts, l'ammoniaque, le carbonate d'ammonium et le chlorure d'ammonium mais insoluble dans l'ammoniac liquide de l'éthanol
<i>Masse volumique</i>	5.6 g.cm ⁻³ pour le cristal hexagonal ; 5.47 g.cm ⁻³ pour le corps amorphe

II.2.2 Présentation du fluide de base :

La lubrification des pièces mécaniques des moteurs automobiles est fondamentale. Sans la lubrification, les pièces qui se frottent entre elles s'échauffent, entraînant l'augmentation de la température, risquant de provoquer le grippage des surfaces en contact, ce qui conduirait directement à leur destruction.

Le fluide de base utilisé est une huile SAE 20W40 de marque Naftal. C'est une huile de type synthétique, conçue pour les moteurs diesel et à essence à quatre temps les plus récents. Assure le refroidissement, le nettoyage et la protection du moteur contre les dépôts. Elle est commercialisée sous le format bidon de 5 litres. La vidange est préconisée tous les 10000 Km. La Fig. (II.4) montre une photographie de l'emballage commercial de cette huile. Les caractéristiques de l'huile SAE 20W40 sont énumérées dans le Tableau (II.4).



Figure II.4 : Emballage commercial de l'huile SAE 20W40

Tableau II.4:Caractéristiques du huile lubrifiante SAE20W40

Caractéristiques	Valeur
Densité à 15°C, Kg/l	0.880
Viscosité cinématique à 40°C, mm ² /s	136.4
Viscosité cinématique à 100°C ; mm ² /s	15.4
Indice de viscosité	113
Point d'écoulement, °C maximum	-27typ, -26 max
Point d'éclair	230
Nombre total de base (TBN), mg KOH/g	9.2
Cendres sulfatées,% poids	1.0

II.3 Procédure de préparation :

Dans cette étude, des nanofluides ont été préparés en utilisant la méthode en deux étapes. Les nanoparticules utilisées dans cette méthode ont d'abord été préparées sous forme de poudres sèches à l'aide de méthodes chimiques ou physiques, puis dispersées dans le liquide de base pour le nanofluide souhaité. Au total, trois nanofluides, à savoir Fe_2O_3 /huile, Al_2O_3 /huile et ZnO /huile, ont été préparés avec des fractions volumiques solides de 0.1%,0.25 %, 0.5 %, 0.75 % et 1 %. Pour cela, l'équation (II.1) de la fraction volumique a été utilisée pour déterminer le poids des différentes nanoparticules correspondant à chaque fraction volumique.

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{V_{nanoparticules}}{V_{nanoparticules} + V_{20W40}} \\ &= \frac{\left(\frac{m}{\rho}\right)_{nanoparticules}}{\left(\frac{m}{\rho}\right)_{nanoparticules} + \left(\frac{m}{\rho}\right)_{20W40}} \times 100 \end{aligned} \quad (II.1)$$

D'où :

$$m_{particule} = \frac{\left(\frac{m}{\rho}\right)_{20W40}}{\frac{100}{\varphi} - 1} \rho_{particule} \tag{II.2}$$

Dans cette équation, ρ est la masse volumique, φ est la fraction volumique solide des nanoparticules et m est la masse.

Connaissant la masse de l'huile utilisée $m_{20W40} = 26.359$ g et la masse volumique des nanoparticules Fe_2O_3 , Al_2O_3 , ZnO et de l'huile de base SAE 20W40 Les masses des nanoparticules calculées correspondantes à chaque fraction volumique sont données dans le tableau II.5.

Tableau II.5 : Masse des nanoparticules Al_2O_3 , Fe_2O_3 et ZnO .

Fluide de base	Nanoparticule	$\rho_{\text{Fluide de base}}$ (g/cm ³)	$\rho_{\text{Nanoparticule}}$ (g/cm ³)	Concentration (%)	$M_{\text{Fluide de base}}$ (g)	$M_{\text{Nanoparticules}}$ (g)
SAE20W40	Oxyde d'aluminium Al_2O_3	0.879	3.97	0.10	26.359	0.1192
				0.25		0.2983
				0.50		0.5981
				0.75		0.8997
				1.00		1.2027
SAE20W40	Oxyde de fer Fe_2O_3	0.879	5.240	0.10	26.359	0.1572
				0.25		0.3939
				0.50		0.7897
				0.75		1.1876
				1.00		1.5875
SAE20W40	Oxyde de zinc ZnO	0.879	5.6	0.10	26.359	0.1681
				0.25		0.4209
				0.50		0.8439
				0.75		1.2692
				1.00		1.6965

La masse des nanoparticules calculées a été pesée à l'aide d'une balance numérique de précision Fig.(II.5).



Figure II.5 : Balance de précision

Les nanoparticules pesées ont été ajoutée au fluide de base puis le mélange a été agité à l'aide d'un agitateur magnétique pendant 2 heures pour obtenir un mélange homogène et uniforme comme indiqué sur la figure (II.6).



Figure II.6 : Agitateur Magnétique

Pour obtenir une suspension homogène, le mélange a été soumis pendant trois heures à une homogénéisation par ultrasons à l'aide d'un homogénéisateur à ultrasons (1200 w, 20 kHz ; Hielscher Ultrasonics GmbH, Teltow, Allemagne) Fig.(II.7).Ce qui a permis de supprimer l'agglomération et l'agrégation des nanoparticules et d'obtenir des suspensions stables jusqu'à 72 h.



Figure II.7 : Homogénéisateur à Ultrasons UP 200H

Cette manipulation est répétée pour chaque échantillon. On obtient quinze échantillons avec différentes concentrations à savoir 0.1%, 0.25%, 0.5%, 0.75% et 1% pour les trois nanofluides Fe_2O_3 /huile, Al_2O_3 /huile et ZnO /huile. Les nanoparticules et les différents échantillons de nanolubrifiants préparés sont présentés dans la Figure (II.8).

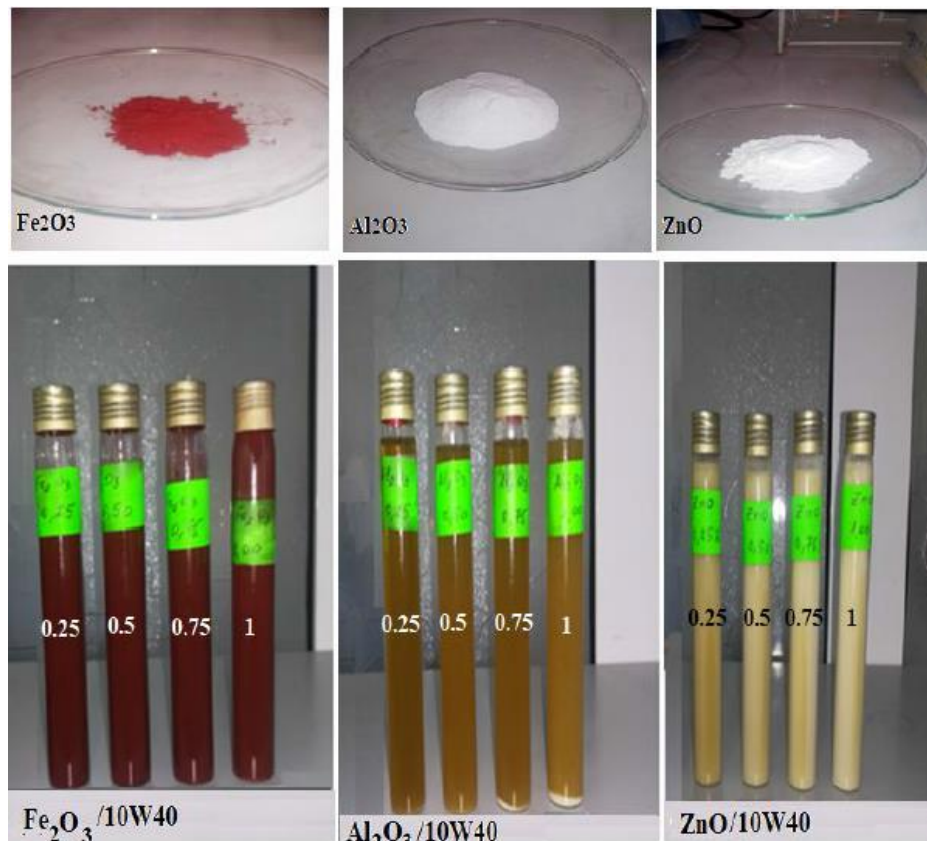


Figure II.8 : Les nanoparticules Fe_2O_3 , Al_2O_3 , et ZnO et leurs nanofluides correspondants.

II.4 Mesures rhéologiques :**II.4.1- Dispositif expérimental :**

Les mesures rhéologiques sont réalisées essentiellement sur un rhéomètre rotatif à contrainte imposée MCR302 Fig. (II.9). La géométrie de mesure est un cylindre concentrique à double entrefer Fig. (II.10). D'autres accessoires sont utilisés pour le fonctionnement du rhéomètre tel que le compresseur à air qui alimente le palier à air de l'arbre tournant du rhéomètre, le bain de circulation qui permet la régulation de la température dans la cellule de mesure et un ordinateur muni d'un logiciel d'exploitation Fig. (II.11). Les caractéristiques du rhéomètre sont indiquées dans le tableau II.6 .



Figure II.9 : Rhéomètre Anton Paar MCR 302



Figure II.10 : Géométrie de mesure : cylindres à double entrefer concentriques



Figure II.11 : Accessoires du rhéomètre MCR 302

Tableau II.6:Caractéristiques du rhéomètre rotatif à contrainte imposée MCR302

<i>Appellation</i>	MCR302
<i>Constructeur</i>	Anton Paar France
<i>Type</i>	Rotatif à contrainte imposée
<i>Gamme de couple</i>	10 Nn.m à 200 mN.m
<i>Gamme de vitesse</i>	10^{-9} à 314 rad/s
<i>Résolution angulaire</i>	10 nrad
<i>Gamme de fréquence</i>	10^{-7} à 628 rad/s
<i>Gamme de température</i>	Bain : -30 à +180 °C Peltier : -40 à 200 °C Electrique : -130 à 400 °C
<i>Observations</i>	Palier à air Moteur synchrone Force normale de 0.005 à 50 N

II.4.2 Déroulement des essais :

Les mesures rhéologiques ont été réalisées à l'aide d'un rhéomètre rotatif MCR 302 (Anton Paar, Graz, Autriche). La géométrie utilisée était une géométrie de cylindre concentrique à double espace. La précision et la répétabilité de l'appareil étaient de $\pm 1,0 \%$ et $\pm 0,2 \%$ respectivement. Les essais ont été réalisés avec différents taux de cisaillement, allant de 100 s^{-1} à 300 s^{-1} , et à différentes températures, allant de 20 °C à 60 °C . Pour minimiser la répétabilité, les expériences ont été répétées à différentes températures, concentrations et taux de cisaillement, et les données moyennes ont été calculés.

En tout quinze échantillons pour différentes concentrations plus l'échantillon de l'huile pure SAE20W40 sont préparés. Après l'étape de préparation des échantillons Fe_2O_3 /huile, Al_2O_3 /huile et ZnO /huile, la phase des mesures rhéologiques est ensuite entamée.

- On commence par le premier échantillon avec l'huile pure ($\phi = 0\%$). Le but de la manipulation est de mesurer la viscosité (η) et la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$).
- Après le lancement du logiciel du rhéomètre, on choisit un nouveau projet, on choisit le type de fluide (liquide de faible viscosité), ensuite, on choisit le type d'application (rotation, courbe d'écoulement) Fig. (II.12). Pendant l'initialisation, la tête de mesure se déplace vers la position supérieure pour vérifier le capteur de position. Le rotor exécute plusieurs rotations à grande vitesse pour vérifier le capteur de vitesse. On monte la géométrie de mesure : système à double entrefer .

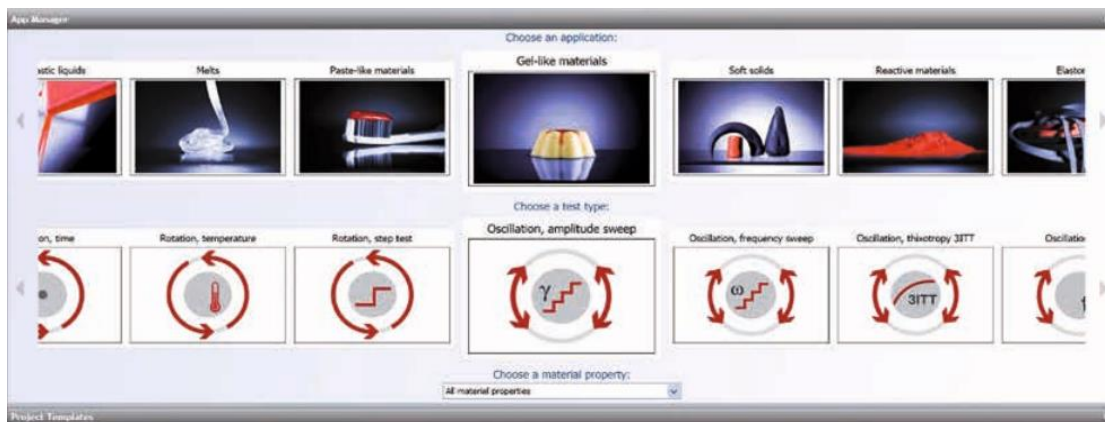


Figure II.12 : Interface du projet

- Pour la configuration des paramètres de mesure : 200 points de mesure ont été sélectionnés et le taux de cisaillement varie de 100 s^{-1} à 300 s^{-1} . La température est fixée à $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- On déplace la tête de l'instrument vers le haut et on charge l'échantillon à l'aide d'une seringue. On abaisse le corps de mesure en position de mesure, si l'échantillon déborde légèrement, on retire l'excédent d'échantillon jusqu'en haut du cylindre situé au centre du godet.
- On règle la position de mesure (gap zéro), et on démarre les mesures.
- Pour le même échantillon, cette manipulation est effectuée pour les autres températures à savoir 30 , 40 , 50 et $60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- La même manipulation est répétée avec les autres échantillons (0.10% ; 0.25% , 0.5% , 0.75% et 1%).

II.5 Conclusion :

A travers cette partie, nous avons présenté les nanoparticules et le fluide de base utilisés pour la fabrication des nanolubrifiants. Les nanoparticules choisies sont des oxydes, ce choix est justifié par l'utilisation fréquente de ces nanoparticules et par la disponibilité dans les laboratoires de recherche universitaires. Pour l'huile de base SAE20W40 est une huile parmi la plus utilisée et elle est préconisée pour les moteurs diesel et essence, en plus c'est une huile locale de production nationale. Le problème majeur rencontré pendant les manipulations expérimentales est celui de la stabilité des nanofluides. L'utilisation d'un homogénéisateur à ultrasons permet une stabilité de 72 heures et juste après commence l'apparition des premières agglomérations de nanoparticules, la raison pour laquelle les mesures rhéologiques sont effectuées juste après la préparation des nanolubrifiants. Pour la fiabilité des mesures, chaque mesure est répétée trois fois et la moyenne de ces mesures est prise en considération.

Chapitre -III-

Caractérisation rhéologiques des
Nanolubrifiants

Résultats et Discussion

III.1 Introduction :

Le présent travail expérimental a pour but d'étudier l'influence des différents paramètres tels que le taux de cisaillement, la température et la concentration volumique des particules solides sur le comportement rhéologique des différents nanolubrifiants. L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats obtenus et de les interpréter tout en faisant une comparaison entre les résultats des nanolubrifiants étudiés d'une part et avec les résultats d'autres chercheurs dans le domaine d'autres part.

III.2 Résultats et discussion :**III.2.1 Analyse XRD :**

La diffraction des rayons X permet d'analyser, de manière non destructive, la structure cristallographique des matériaux. Elle permet d'identifier et quantifier les phases cristallines, de déterminer la structure cristallographique de ces phases, de mesurer des contraintes résiduelles et d'estimer la taille des cristallites.

Pour l'étude de la structure cristallographique et de la pureté de phase des nanoparticules, un diffractomètre à rayons X Rigaku MiniFlex 600 a été utilisé Fig.(III.1), générant un rayonnement $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,540530 \text{ \AA}$) et alimenté par un générateur programmé à 40 kV et 15 mA. Les conditions de travail étaient généralement une vitesse de balayage de $0,02^\circ/\text{s}$ dans la plage 0° - 80° (2θ). Dans un mode de balayage normal, le faisceau de rayons X tombe selon un angle θ avec les plans du réseau, puis est diffracté selon un angle 2θ avec la direction incidente Fig.(III.2). Enfin, l'intensité du faisceau diffracté est enregistrée en fonction de 2θ .



Figure III.1: Diffractomètre DRX Rigaku MiniFlex 600

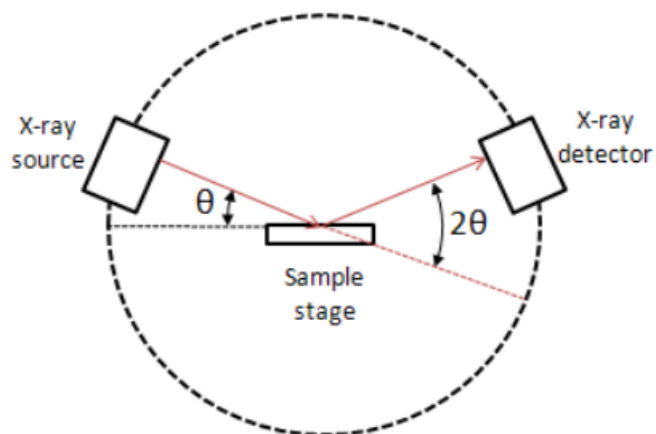


Figure III.2: Schéma descriptif du principe de fonctionnement du diffractomètre à rayons X.

La figure(III.3) montre les Spectres de diffraction des rayons X des nanoparticules de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , et ZnO affichés dans la plage de 0 à 80°. La taille moyenne des particules des nanoparticules s'est avérée être de 58 nm.

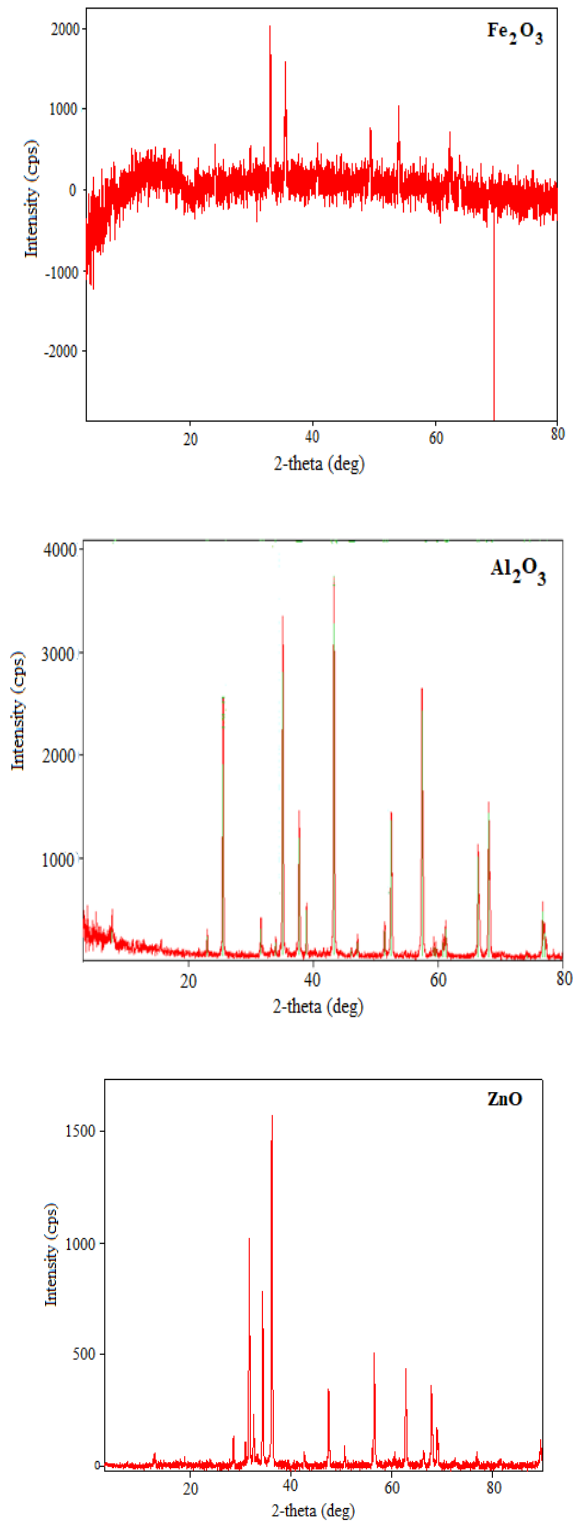


Figure III.3: Spectre de diffraction des rayons X des nanoparticules **Fe₂O₃** , **Al₂O₃** ,
et **ZnO**

III 2.2 Analyse du comportement rhéologique :

III2.2.1 Effet du taux de cisaillement sur la viscosité :

Le taux de cisaillement est un facteur important qui influence la viscosité d'un nanofluide. L'influence du taux de cisaillement sur le mouvement moléculaire et les interactions intermoléculaires affecte directement la viscosité du liquide. Cet effet peut être observé en comparant des nanofluides avec différents niveaux de taux de cisaillement. De plus, ce phénomène peut également être observé dans les fluides non newtoniens où la relation entre la force de cisaillement et la viscosité apparente n'est pas linéaire.

Dans cette objectif, on a représenté les viscosités dynamiques des nanolubrifiants avec une concentration volumique de 1%, en fonction du taux de cisaillement à différentes températures Fig.(III.4). Selon cette figure, la variation de la viscosité est de 1,5% à 20 ° C, ce qui suggère que le comportement des nanofluides était identiques et qu'ils peuvent être approximativement traités comme des fluides newtoniens. Cependant, à 40 °C et 60 °C, la viscosité varie de 15%, les nanofluides présentent un comportement non newtonien.

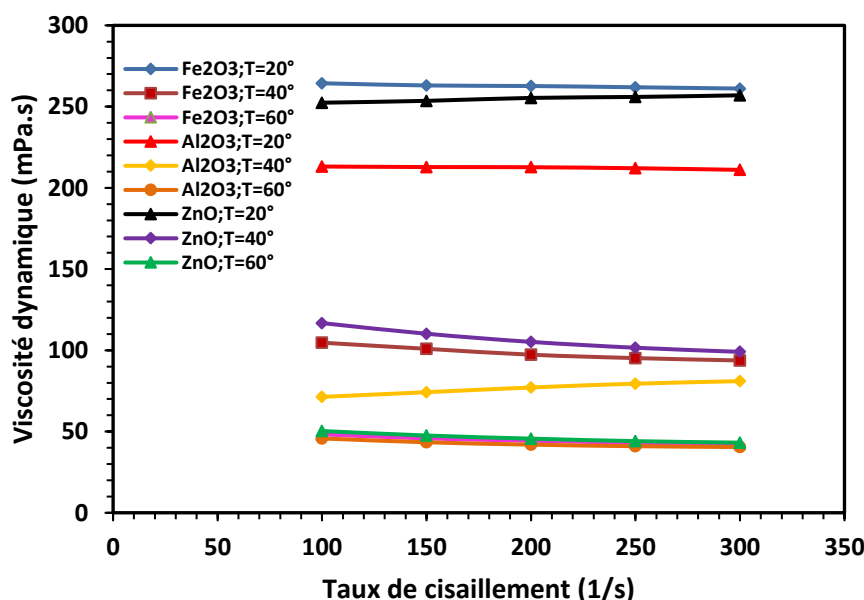
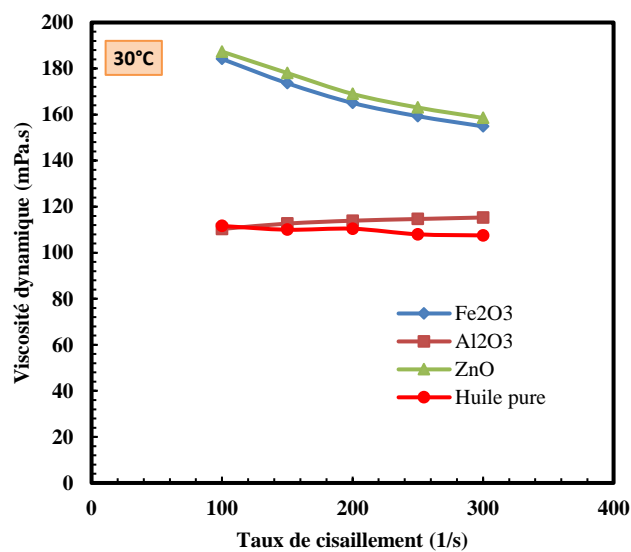


Figure III.4 : Viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement pour différentes températures ; $\phi=1\%$

La figure (III.5) illustre la viscosité des différents nanofluides par rapport au taux de cisaillement à différentes températures. Sur cette figure, on constate le comportement purement newtonien du fluide de base dans les taux de cisaillement mesurés. En ajoutant un certain nombre de nanoparticules solides au fluide de base, le comportement rhéologique des fluides a changé et la viscosité est devenue une fonction du taux de cisaillement. Comme on peut le voir dans la Figure (III.5), le taux de cisaillement n'a eu qu'un effet minime sur la viscosité de Al_2O_3 /huile alors que les nanofluides Fe_2O_3 /huile et ZnO /huile ont montré un comportement clair de rhéofluidification. Un tel comportement de fluidification par cisaillement est peut-être dû à l'alignement des amas de nanoparticules dans le sens de l'écoulement provoqué par l'augmentation du taux de cisaillement, entraînant ainsi une diminution initiale de la viscosité. D'autres chercheurs ont également observé un comportement similaire [60,61]. L'étude de ce comportement est détaillée par la suite en déterminant l'indice de puissance n .



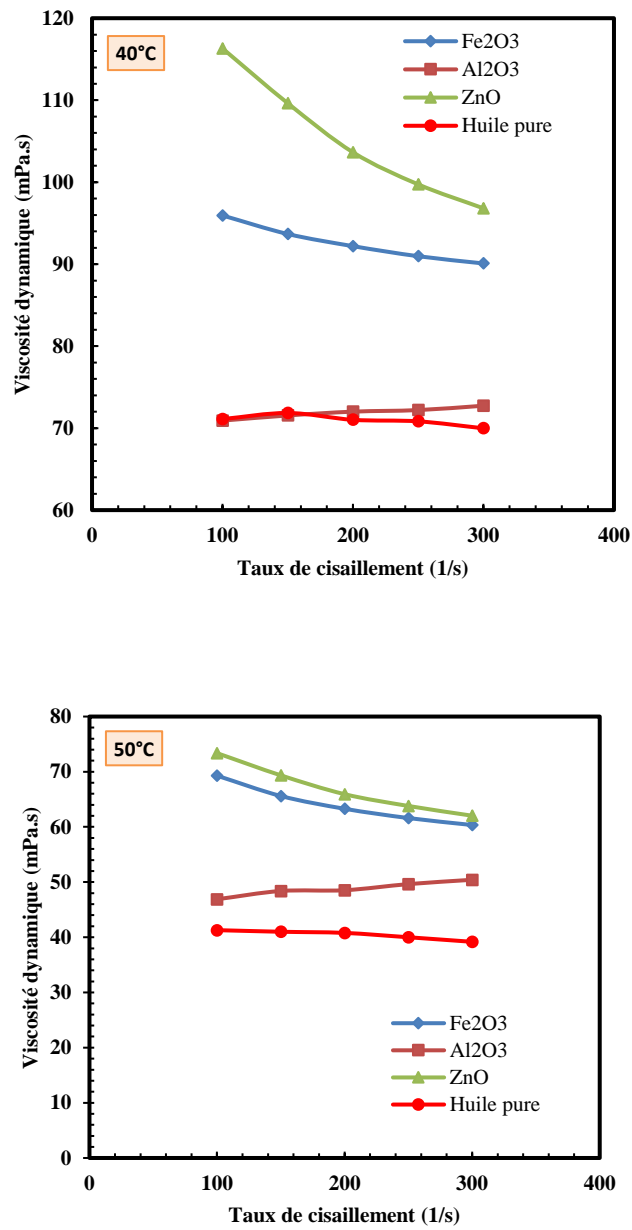


Figure III. 5 : Viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement ; $\phi=0.5\%$.

L'équation d'Ostwald-de Waele présentée ci-dessous a été utilisée pour identifier le comportement rhéologique des fluides :

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (III. 1)$$

Où n est l'indice de la loi de puissance, k est l'indice de consistance et τ est la contrainte de cisaillement. Selon la loi de puissance, la viscosité du fluide est définie par l'équation suivante :

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

Dans l'équation (III.2), η représente la viscosité apparente et $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement. L'indice de la loi de puissance n , également appelé indice rhéologique, est un paramètre clé dans le domaine de la rhéologie. Il est utilisé pour décrire le comportement des fluides non newtoniens, qui ne suivent pas la relation linéaire traditionnelle entre contrainte de cisaillement et taux de cisaillement. Si n est égal à 1, le fluide est newtonien, si $n < 1$, le fluide est rhéofluidifiant, et si $n > 1$, le fluide est rhéoépaississant.

Afin d'obtenir les indices n et k , des courbes logarithmiques de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ont été tracées. Ensuite, les indices ont été calculés par l'équation suivante :

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

La figure (III.6) montre les courbes de contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement des nanofluides pour une fraction volumique solide de 0,5 %.

Les valeurs ont été obtenues à partir de la régression linéaire des courbes du diagramme logarithmique $\ln(\tau)$ en fonction de $\ln(\dot{\gamma})$ Fig.(III.7). Les indices n et k ont été déterminés pour tous les nanofluides à différentes températures et différents fractions volumiques solides. Les résultats sont répertoriés dans le tableau (III.1).

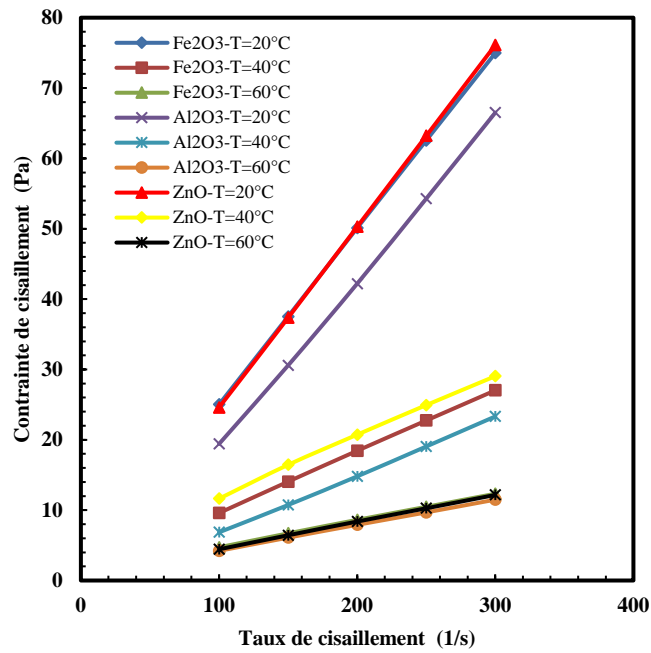


Figure III.6 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ; $\phi=0.5\%$.

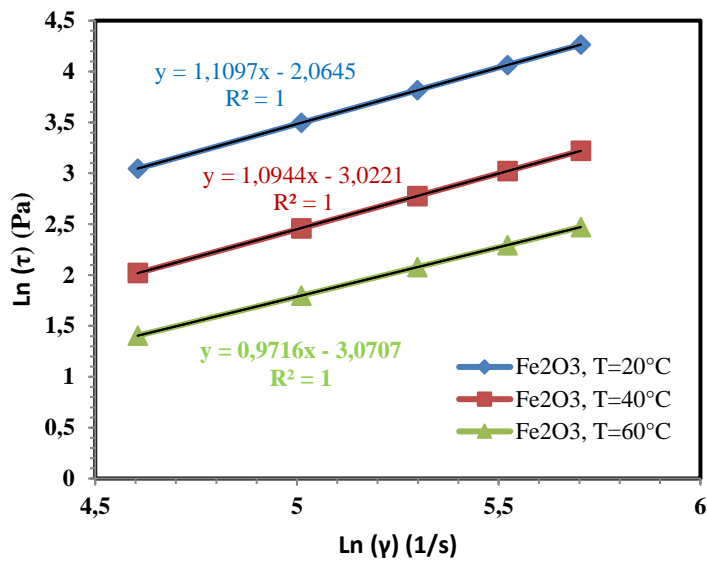


Figure III.7 : Diagramme logarithmique contrainte de cisaillement - taux de cisaillement, $\phi = 0.75\%$

Tableau III. 1 : Indices de consistances et de puissances.

Concentration (% vol)	Température (°C)	Fe_2O_3		Al_2O_3		ZnO	
		k	n	k	n	k	n
0.5	20	0.25	0.99	0.11	1.12	0.21	0.95
0.5	40	0.12	0.94	0.07	1.11	0.18	0.89
0.5	60	0.08	0.87	0.06	0.91	0.08	0.87
0.75	20	0.14	1.10	0.11	0.99	0.14	1.11
0.75	40	0.12	1.09	0.10	0.95	0.12	1.11
0.75	60	0.04	0.97	0.04	0.98	0.07	0.9
1	20	0.27	0.98	0.14	1.08	0.23	0.93
1	40	0.15	0.90	0.07	1.11	0.21	0.84
1	60	0.08	0.87	0.04	0.98	0.09	0.85

Les variations des indices n et k de chaque nanofluide à différentes températures avec une fraction volumique de 0,5 % de nanoparticules sont présentées sur la Figure (III.8). Comme on peut le voir sur cette figure, à la même température, la valeur de l'indice k du nanofluide Al_2O_3 /huile est inférieure à celle des deux autres nanofluides, indiquant que la viscosité du nanofluide Al_2O_3 /huile est inférieure à celle des nanofluides Fe_2O_3 /huile et ZnO /huile. Cependant, l'indice k a diminué avec l'augmentation de la température pour tous les nanofluides. En ce qui concerne les variations de l'indice de la loi de puissance, la valeur de n pour les nanofluides à base de Fe_2O_3 et de ZnO est inférieure à 1, ce qui confirme le comportement de rhéofluidification non newtonien de ces nanofluides par rapport au nanofluide à base de Al_2O_3 , qui présentait un Comportement newtonien. Cependant, à haute température (60 °C), l'indice n était presque le même pour tous les nanofluides, ce qui reflète le même comportement rhéologique sous l'effet de la température.

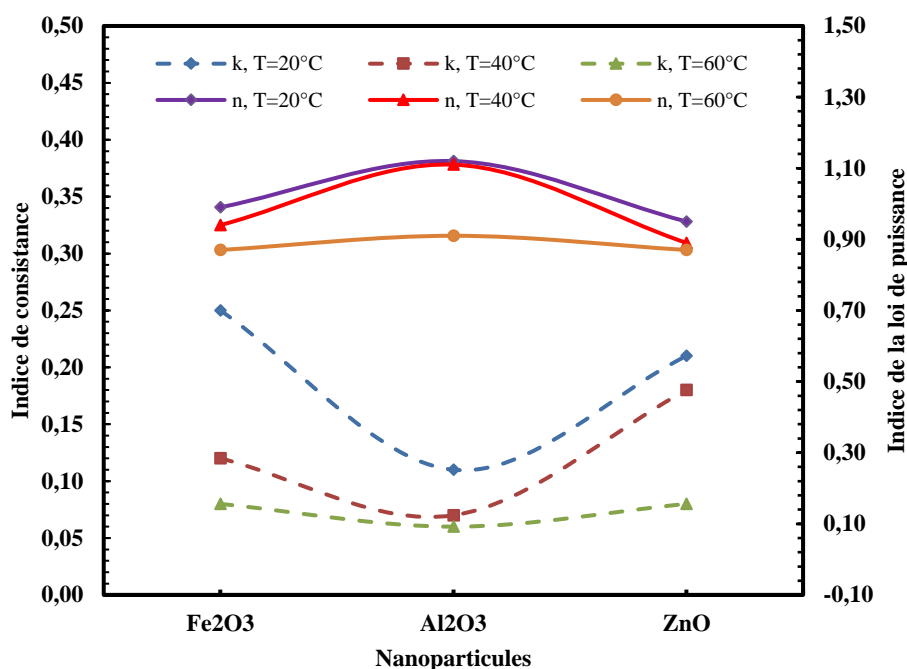


Figure III.8 : Indices de consistance et de la loi de puissance pour $\phi = 0,5 \%$.

III.2.2.2 Effet de la température sur la viscosité :

La température a un impact énorme sur la viscosité. Le nanolubrifiant à des températures plus élevées peut avoir une viscosité totalement différente par rapport au même échantillon à des températures plus basses. La viscosité reflète le comportement moléculaire des échantillons (taille, forme, interactions, microstructure), et donc les variations de température lors des mesures de viscosité peuvent être très révélatrices et fournir des informations sur la microstructure du fluide. La figure (III.9) montre la viscosité dynamique, en fonction de la température, pour des nanofluides à différentes fractions volumiques et à un taux de cisaillement constant de 200 s^{-1} . Les résultats ont montré une tendance générale, selon laquelle la viscosité dynamique diminue lorsque la température augmente à une fraction volumique constante pour tous les nanofluides. Plus précisément, lorsque la température est augmentée de 20 °C à 60 °C , la viscosité dynamique a diminué de 85 %, passant de 260 mPa.s à 40 mPa.s . La viscosité maximale a été observée pour le nanofluide Fe_2O_3 /huile avec une fraction volumique de 1 %, alors que la viscosité minimale a été observée pour le fluide de base. Une augmentation de la température entraîne une augmentation de la distance intermoléculaire des nanoparticules et du fluide de base, ce qui entraîne une réduction de leur résistance à l'écoulement et par

conséquence une réduction de la viscosité des nanofluides. Les courbes de viscosité convergeaient presque vers la même valeur à $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, suggérant que l'effet de la fraction volumique solide était négligeable par rapport à celui de la température.

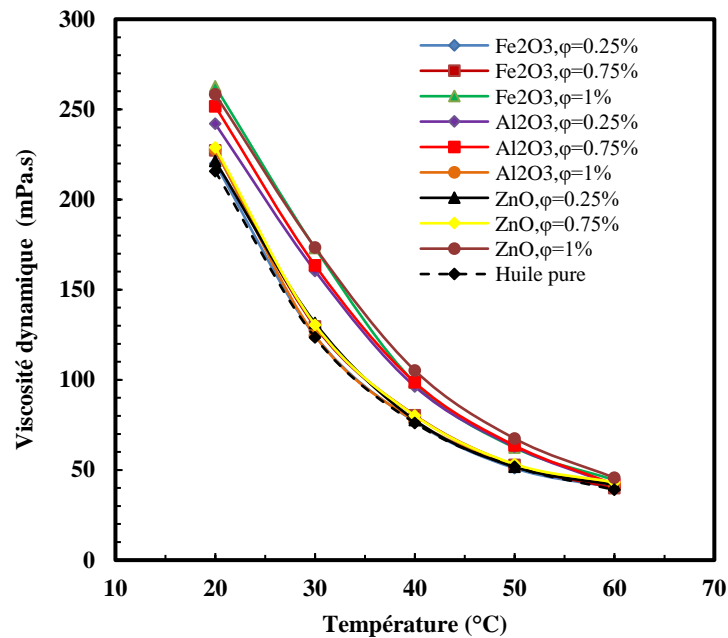


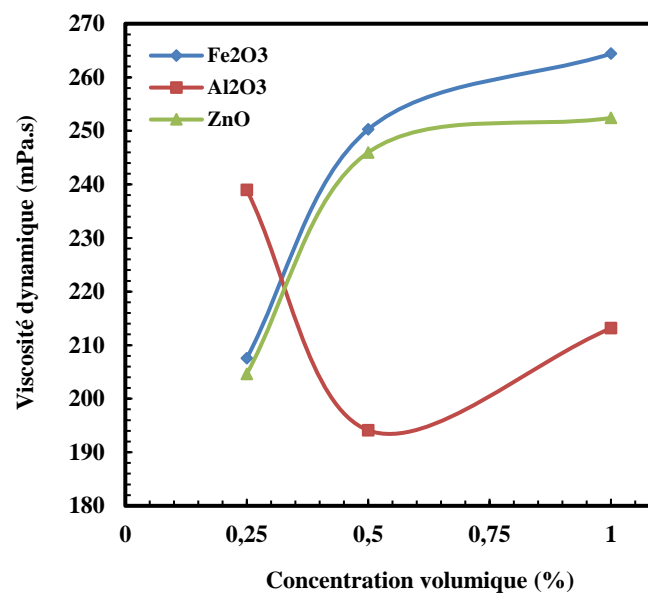
Figure III.9 :Viscosité dynamique en fonction de la température pour différentes concentrations ; $\dot{\gamma}=200\text{s}^{-1}$.

III.2.2.3 Effet de la concentration sur la viscosité :

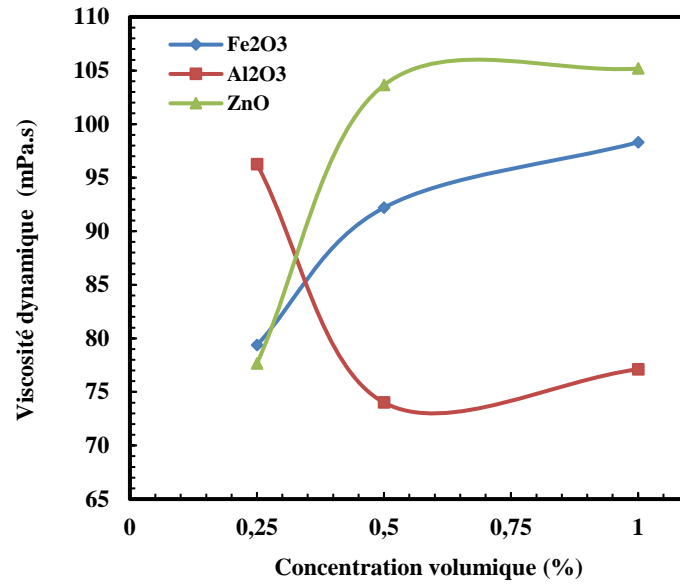
La fraction volumique solide est un paramètre très important qui affecte le comportement rhéologique des nanofluides. La variation de la viscosité dynamique des nanolubrifiants étudiés en fonction de la concentration solide à différentes températures et différents taux de cisaillement est mentionnée sur la Figure (III.10). Comme on peut l'observer sur cette figure, la viscosité des nanofluides à base de nanoparticules Fe_2O_3 et ZnO est significativement plus élevée que celle du nanofluide à base de nanoparticules Al_2O_3 . Le comportement rhéologique du nanofluide Al_2O_3 /huile est différent de celui des deux autres nanofluides. De plus, la Figure (III.10) montre qu'à mesure que la fraction volumique solide augmente, la viscosité augmente également, sauf pour le nanofluide Al_2O_3 , où la viscosité dynamique

diminue à de faibles fractions volumiques (entre 0,25 % et 0,5 %) mais elle augmente à des fractions volumiques supérieures à 0,5 %.

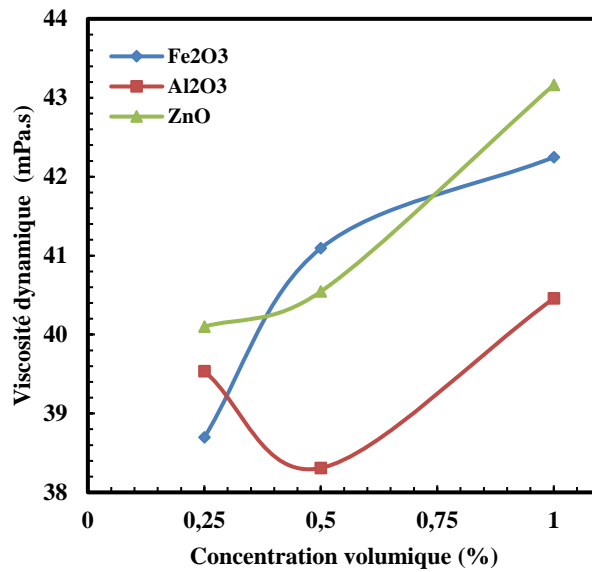
Plusieurs études expérimentales ont conclu que l'ajout de nanoparticules augmente la viscosité des fluides. La présence de nanoparticules affecte la contrainte de cisaillement du fluide en raison de l'augmentation du frottement interne du fluide, ce qui, à son tour, permet au fluide de résister davantage à l'écoulement, ce qui est synonyme d'augmentation de la viscosité. D'autre part, l'augmentation du nombre de particules solides dans une quantité spécifique de fluide conduit à des nano agrégats plus grands en raison des forces de van der Waals entre les particules. Ces nano agrégats empêchent le mouvement des couches d'huile les unes sur les autres, conduisant à une viscosité plus élevée [62].



$$T=20^{\circ}\text{C}, \dot{\gamma} = 100\text{s}^{-1}$$



$T=40^{\circ}\text{C}$, $\dot{\gamma} = 200\text{s}^{-1}$



$T=60^{\circ}\text{C}$, $\dot{\gamma} = 300\text{s}^{-1}$

Figure III.10 :Viscosité dynamique en fonction de la concentration volumique

III.3 Conclusion :

La viscosité des nanofluides a été examinée en termes de différentes variables, notamment le taux de cisaillement, la température et la fraction volumique. Ainsi une étude comparative du comportement rhéologique des nanofluides a été réalisée. Ce comportement n'est pas identique pour tous les nanolubrifiants.

La viscosité du nanofluide Al_2O_3 /huile était significativement inférieure à celle des nanofluides Fe_2O_3 /huile et ZnO /huile. Ces derniers nanolubrifiants présentent un comportement non newtonien rhéofluidifiants par rapport au comportement newtonien du nanolubrifiant Al_2O_3 /huile. Tous les nanofluides étudiés avaient une viscosité qui diminuait avec l'augmentation de la température.

Pour l'effet de la concentration en nanoparticules solides. La viscosité des nanofluides Fe_2O_3 /huile et ZnO /huile augmente avec l'augmentation de la concentration. Pour le nanofluide Al_2O_3 , la viscosité dynamique a diminué à de faibles fractions volumiques (inférieures à 0,5 %) mais a augmenté à des fractions volumiques supérieures à 0,5 %. A haute température, l'effet de la fraction volumique solide devient négligeable par rapport à celui de la température.

CHAPITRE -IV-

Modélisation du Comportement Rhéologique du Nanofluide Fe_2O_3 /SAE20W40 par Application des Réseaux de Neurones

IV.1 Introduction :

Pendant des décennies, les scientifiques ont pour rêve de développer des machines intelligentes avec des éléments simples en s'inspirant du cerveau humain. C'est en 1940 que ce rêve a vu le jour, les chercheurs ont pu développer des modèles simples de neurones biologiques, c'est grâce à McCulloch et Pitts qui étaient les premiers pionniers dans ce domaine en publiant une étude systématique du réseau neurologique artificiel.

Les réseaux neurologiques ont montré une grande capacité d'imiter le cerveau humain ainsi que sa capacité d'apprendre et répondre, ils sont utilisés dans un grand nombre d'applications et ont montré une grande efficacité en exécutant des fonctions complexes dans une variété de champs. Depuis ces travaux, les applications des réseaux de neurones n'ont cessé de croître.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la viscosité dynamique d'un nanofluide par l'approche de réseaux de neurones artificiels (RNA). Le principe d'un RNA est présenté ainsi que la définition de ces différents modèles. Les architectures neuronales les plus utilisées et les algorithmes d'apprentissage sont décrits. Nous présentons également la procédure de modélisation et l'évaluation des performances de ce modèle.

IV.2 Principe d'un réseau de neurone artificiel :

Les réseaux de neurones artificiels ou réseaux connexionnistes leur principe est de mimer les cellules du cerveau humain et leurs interconnexions afin d'exécuter des calculs complexes et de trouver, par apprentissage, une relation non linéaire entre des données numériques et des paramètres.

Le cerveau humain possède deux hémisphères latérales reliées par le corps calleux et d'autres ponts axonaux, il pèse moins de deux kilogrammes et contient mille milliards de cellules, dont 100 milliards sont des neurones constitués en réseaux.

Le neurone biologique (Figure .IV.1) est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ils conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone. Les neurones font une

sommation des signaux reçus en entrée et en fonction du résultat obtenu vont fournir un courant en sortie [63] .

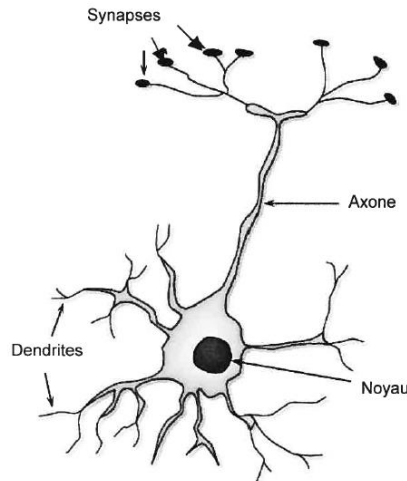


Figure .IV.1 : Exemple de neurone biologique [64]

La Figure (IV.2) montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. A chaque connexion est associé un poids.

Le modèle général du neurone artificiel est composé des éléments suivants :

- Une ou plusieurs entrées pondérées,
- Un sommateur,
- Une fonction de transfert,
- Une sortie.

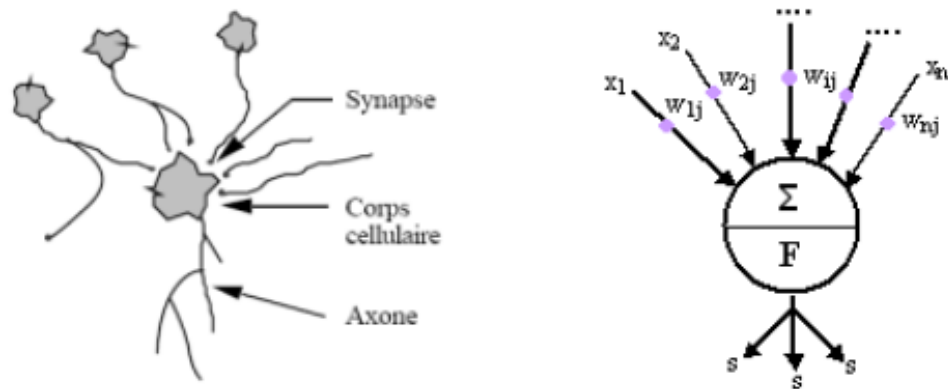


Figure IV.2: Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel

En mathématique, on peut décrire le modèle d'un réseau de neurone par l'équation suivante :

$$s_k = \sum_{i=1}^m w_{ik} x_i + b_k \quad (IV.1)$$

La sortie du réseau de neurones a pour expression :

$$y_k = f(s_k)$$

Avec :

- x_i est l'entrée i ,
- w_{ij} est la valeur du poids synaptique reliant l'entrée i au neurone j ,
- b_k est le biais,
- Σ est la somme pondérée des entrées x_i ,
- F est la fonction de transfert,
- s est la sortie du neurone.

IV.3 Les réseaux de neurones :

IV.3.1 Définition :

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des processeurs élémentaires fortement connectés fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit [65].

De point de vue modélisation mathématique, on peut définir un réseau de neurone artificiel par les quatre éléments suivants :

- La nature des entrées et des sorties : Elles peuvent être :
 - Binaire : (-1; +1) ou (0,1)
 - Réelles.
- La fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées : Elle peut être :
 - Booléenne
 - Linéaire
 - Affine
 - Polynomiale de degré supérieur à deux
- La fonction d'activation du neurone qui définit son état en fonction de son entrée totale : Elle peut être :
 - Une fonction binaire à seuil, dans ce cas on s'arrange pour que la forme de la fonction soit telle qu'on puisse utiliser la fonction de Heaviside (figure IV.3.a) ou la fonction signe (figure IV.3.b);
 - Une fonction linéaire à seuil (figure IV.4.a) : Soit SATUR la fonction à seuil;
 - Une fonction sigmoïde (figure IV.4.b).
- La fonction de sortie qui calcule la sortie du réseau en fonction de son état d'activation; en général cette fonction est considérée comme la fonction identité.

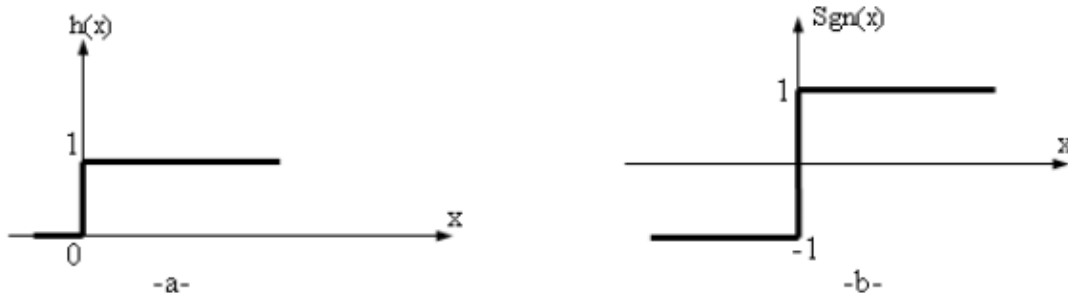


Figure IV.3: a- Fonction de Heaviside, b-Fonction signe

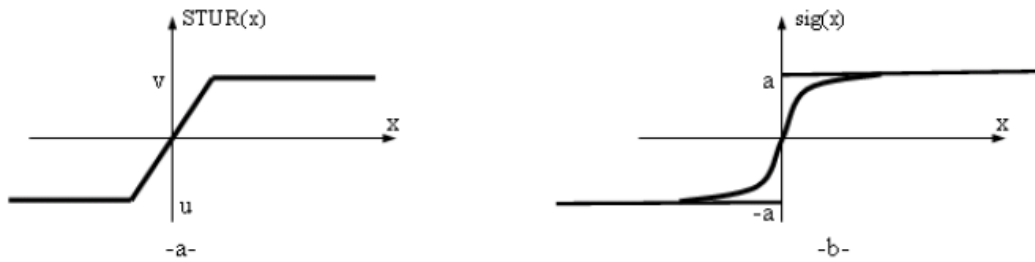


Figure IV.4: a- Fonction linéaire à seuil, b- Fonction sigmoïde

On distingue deux types de réseaux de neurones : Les réseaux non bouclés et les réseaux bouclés.

IV.3.2 Réseaux de neurones statiques (réseaux non bouclés) :

Un réseau est non bouclé, ou statique, si son graphe ne possède pas de cycle. Il réalise donc, de manière générale, une relation algébrique non linéaire entre ses entrées et ses sorties. En d'autres termes Un réseau de neurones non bouclé est donc représenté graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux, Fig. (IV.5), l'information circulant des entrées vers les sorties sans "retour en arrière" [66].

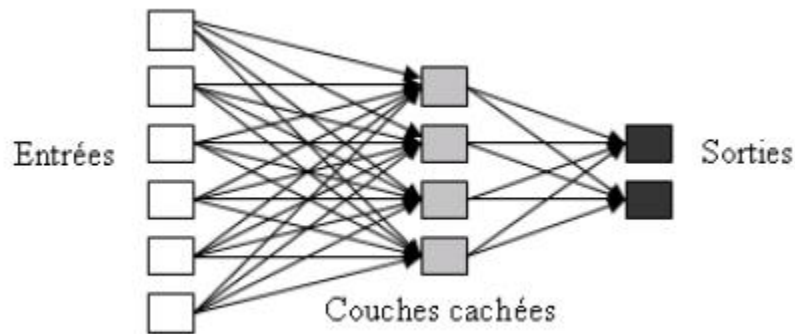


Figure IV.5: structure d'un réseau de neurones non bouclé.

IV.3.3 Réseaux de neurones dynamiques ou réseaux bouclés (ou récurrents) :

L'architecture la plus générale, pour un réseau de neurones, est celle des « réseaux bouclés » ou dynamique, dont le graphe des connexions est cyclique. Lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (un tel chemin est désigné sous le terme de "cycle"). La figure (IV.6) représente un exemple de réseau de neurones bouclé. Les chiffres dans les carrés indiquent le retard attaché à chaque connexion, exprimé en multiple de l'unité de temps. Ce réseau contient un cycle, qui part du neurone 3 et revient à celui-ci en passant par le neurone 4. La connexion de 4 vers 3 ayant un retard d'une unité de temps.

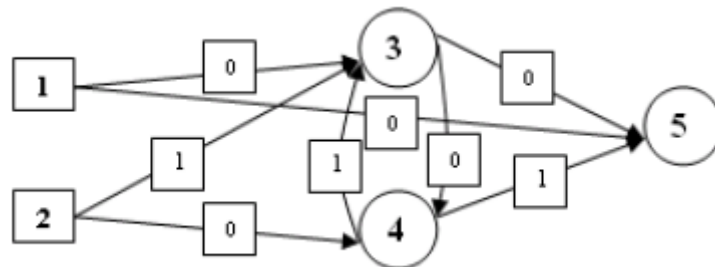


Figure IV.6 : Réseau de neurones bouclé à deux entrées.

IV.4 Types d'apprentissage :

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones au cours de laquelle son comportement est réajusté jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Pour qu'un réseau fonctionne, on lui fournit des données en entrée qu'il doit "apprendre" à reconnaître, soit pour les classer en sous-groupes homogènes (apprentissage non supervisé à des fins descriptives), soit pour les associer à une variable indicatrice de sortie (apprentissage supervisé à des fins prédictives, le cas de notre étude).

IV.4.1 L'apprentissage supervisé :

Dans ce type d'apprentissage, le réseau s'adapte par comparaison entre le résultat qu'il a calculé, en fonction des entrées fournies et la réponse attendue en sortie Fig.(IV.7). Ainsi, le réseau va se modifier jusqu'à ce qu'il trouve la bonne sortie, c'est-à-dire celle attendue, correspondant à une entrée donnée.

⋮

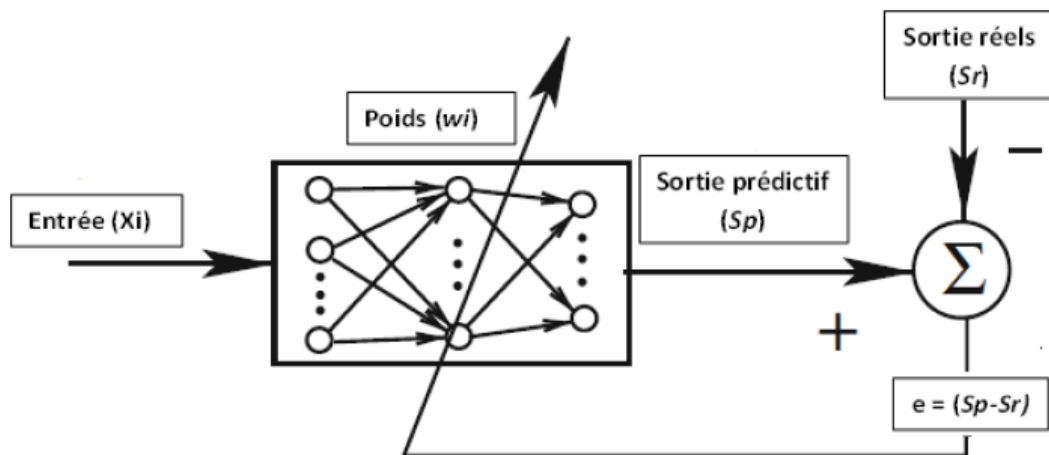


Figure IV.7 : Apprentissage supervisé

IV.4.2 L'apprentissage non supervisé :

Cet apprentissage consiste à détecter automatiquement des régularités qui figurent dans les exemples présentés et à modifier les poids des connexions pour que les

exemples ayant les mêmes caractéristiques de régularité provoquent la même sortie Fig.(IV.8). L'algorithme apprend à partir de données brutes, élabore sa propre classification et présente les structures de données qu'il juge intéressantes. La classification qu'il propose est libre d'évoluer lorsque des éléments nouveaux lui sont présentés.

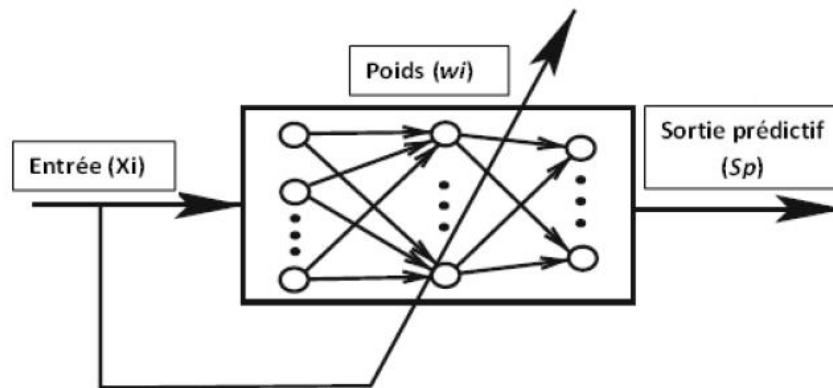


Figure IV.8: Apprentissage non supervisé

IV.6 Modèles des réseaux de neurones :

IV.6.1 Réseau de neurone monocouche : le perceptron

Le perceptron peut être considéré comme le premier des RNA Il se compose d'une rétine et d'une couche qui donne la réponse correspondant à la simulation donnée en entrée Fig. (IV.9). Il existe 2 types de perceptrons : les perceptrons « feed-forward » et les perceptrons récurrents. Les perceptrons récurrents sont ceux qui alimentent leurs entrées avec leurs sorties, par opposition aux perceptrons feed-forward.

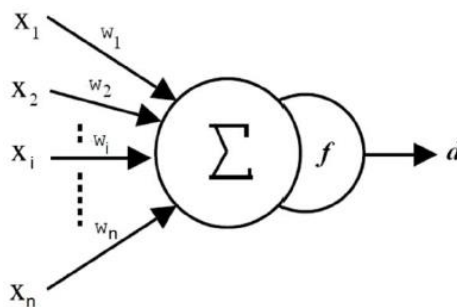


Figure IV.9 : Réseau de neurone monocouche : le perceptron

IV.6.4 Perceptron multicouche (MLP) :

En intelligence artificielle, plus précisément en apprentissage automatique, le perceptron multicouche (multilayer perceptron MLP en anglais) est un type de réseau neuronal artificiel organisé en plusieurs couches Fig. (IV.10). Un perceptron multicouche possède au moins trois couches : une couche d'entrée, au moins une couche cachée, et une couche de sortie. Chaque couche est constituée d'un nombre (potentiellement différent) de neurones. L'information circule de la couche d'entrée vers la couche de sortie uniquement : il s'agit donc d'un réseau à propagation directe (*feedforward*). Les neurones de la dernière couche sont les sorties du système global.

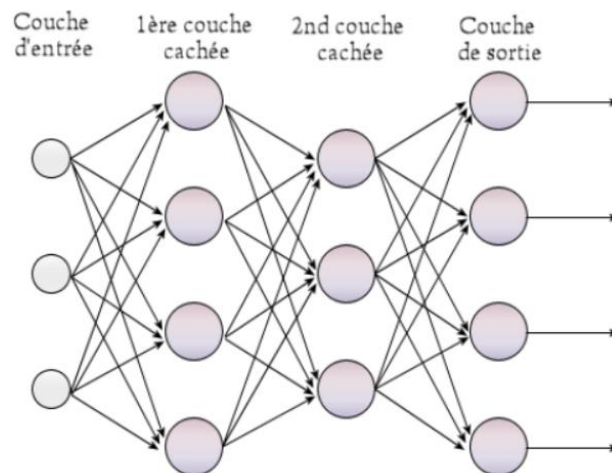


Figure IV.10: Perceptron multicouche (MLP)

IV.7 Procédure de modélisation par les réseaux de neurones :

Les réseaux de neurones artificiels fonctionnent comme un modèle de boîte noire, ne nécessitant aucune information détaillée sur le système. Il s'agit d'une procédure de modélisation mathématique avancée inspirée du système neuronal biologique. L'approche semble parfaitement adaptée aux problèmes où les relations entre les variables ne sont pas linéaires et complexes. Dans la structure des réseaux de neurones multicouches, les neurones sont regroupés en couches, une couche de

neurones d'entrée, une couche de neurones de sortie et une ou plusieurs couches cachées qui sont constituées de nombreux neurones interconnectés avec une fonction d'activation sigmoïd.

L'élaboration d'une base de données est une phase décisive dans la conception d'un modèle neuronal. La sélection des entrées consiste à déterminer les variables pertinentes par rapport à la grandeur à modéliser. Elle vise deux points essentiels, la réduction de la dimension de l'espace de représentation des variables du modèle et l'élimination des entrées qui n'ont pas ou peu d'influence sur la sortie. Dans le but de constituer une base de données fiable et représentative, nous avons suivi une méthodologie qui revêt les étapes suivantes :

- sélection des entrées du modèle neuronal,
- collecte des données,
- mise en forme des données,
- normalisation des données.

La méthodologie adoptée est illustré par l'organigramme de la figure (IV.11).

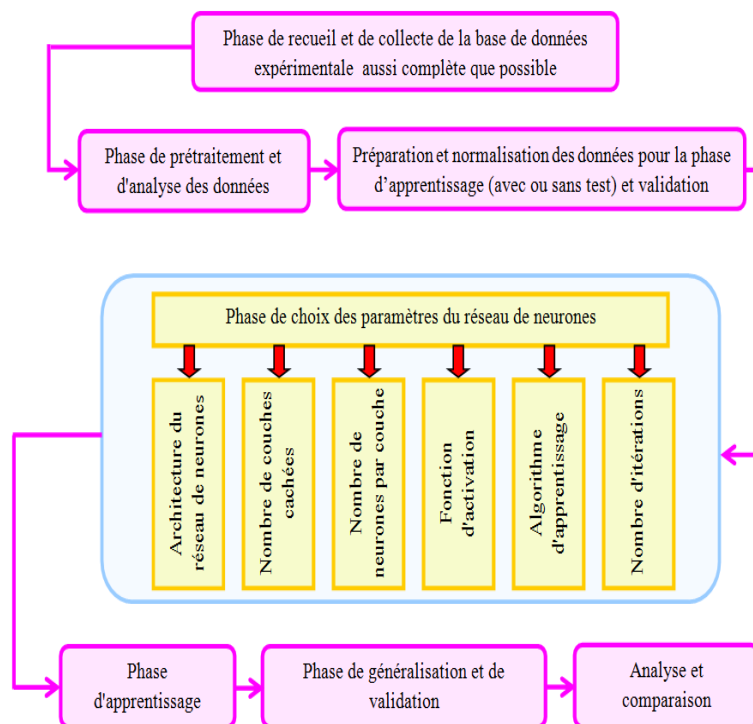


Figure IV.11: Procédure de modélisation par les réseaux de neurones

IV.7.1 Méthodes de résolution :

La technique du Machine Learning a été appliquée pour résoudre des problèmes d'ingénierie complexes avec une réduction considérable du temps de calcul. En particulier, la technique des réseaux neuronaux artificiels (RNA) a été utilisée avec succès pour prédire les propriétés thermophysiques de différentes matières, notamment des nanofluides. Par exemple, la technique RNA a été appliquée pour le développement d'équations de conductivité thermique dédiées aux fluides purs [67,68] et aux nanofluides [69-71] ainsi que pour la modélisation de la viscosité dynamique de plusieurs nanofluides [72].

Dans notre cas d'étude, on vise à construire un modèle neuronal artificiel (RNA), capables de prédire la viscosité dynamique du nanofluide $Fe_2O_3/SAE 20W40$.

Il est donc question, de faire une modélisation statique indépendamment du temps, le réseau adéquat au vue de la monographie consultée ne peut être, en général, qu'un réseau non bouclé type MLP.

La normalisation des valeurs est une étape cruciale dans la conception des réseaux de neurones artificiels, du fait qu'on utilise souvent des fonctions de transfert bornées de type sigmoïdes dans les modélisations statiques. Presque les valeurs de l'entrée du réseau de neurones diffèrent de plusieurs ordres de grandeur, ce qui peut ne pas refléter l'importance relative des entrées déterminant le paramètre désiré à la sortie. Dans ce but, les données d'entrée et de sortie ont été normalisées dans la plage de [-1, 1] en utilisant une double normalisation, la fonction algorithmique et l'algorithme *mapminmax* donné par l'équation (IV.2) qui effectue une normalisation de la valeur maximale et minimale de chaque ligne.

$$y_n = \frac{2(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} - 1 \quad (IV.2)$$

Où x est la valeur du vecteur d'origine, x_{max} et x_{min} sont les valeurs maximale et minimale correspondant à x , respectivement, et y_n est la valeur de vecteur normalisée par le vecteur x .

Après l'examen d'un certain nombre considérable de réseaux de neurones structurés différemment, le réseau de neurones artificiel adéquat sélectionné dans cette investigation, à une couche cachée avec 20 neurones et une couche de sortie avec un seul neurone. Egalement pour le réseau de neurone, la couche cachée a une fonction de transfert tansig et la couche de sortie a une fonction de transfert linéaire. Trois variables, φ : la concentration, T : la température et $\dot{\gamma}$: la vitesse de cisaillement ont été introduites à l'entrée. La figure (IV.12) montre la structure typique du réseau de neurone artificiel RNA.

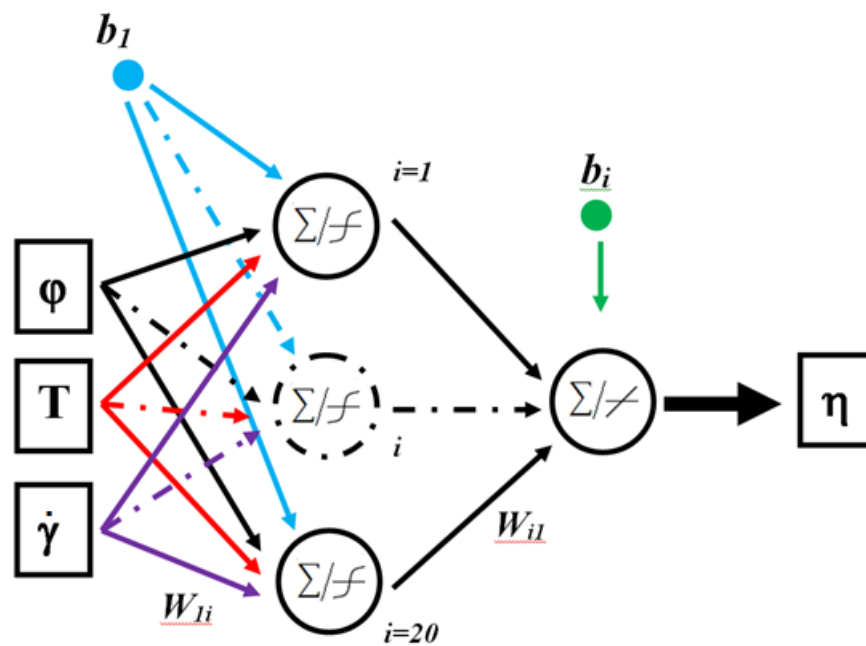


Figure IV.12: Architecture typique du réseau de neurones artificiel

L'équation générale de ce modèle:

$$S = \sum_{i=1}^3 W_{3,i} \text{tansig}(\sum_{j=1}^{20} W_{ij} X_j + b_i) + b_3 \quad (IV.3)$$

Où :

x_i est l'entrée i , w_{ij} est la valeur du poids synaptique reliant l'entrée i au neurone j ,
 b_k le biais,

Equation détaillée pour notre cas :

$$\eta = \text{tansig}(\varphi w_{1,1} + b_1) + \text{tansig}(\varphi w_{1,2} + b_2) + \text{tansig}(\varphi w_{1,3} + b_3) + \dots + \text{tansig}(\varphi w_{1,20} + b_{20}) + w_{3,1}b_3 + \text{tansig}(Tw_{2,1} + b_1) + \text{tansig}(Tw_{2,2} + b_2) + \text{tansig}(Tw_{2,3} + b_3) + \dots + \text{tansig}(Tw_{2,20} + b_{20}) + w_{3,2}b_3 + \text{tansig}(\gamma w_{3,1} + b_1) + \text{tansig}(\gamma w_{3,2} + b_2) + \text{tansig}(\gamma w_{3,3} + b_3) + \dots + \text{tansig}(\gamma w_{3,20} + b_{20}) + w_{3,3}b_3 \quad \text{IV.4}$$

Où :

η est la viscosité; φ est la concentration ; T est la température et $\dot{\gamma}$ est la vitesse de cisaillement .

Le nombre de données expérimentales utilisées dans le RNA est de 5718, qui sont réparties en trois sections: l'ensemble d'apprentissage (5025 données), soit 87 % de la base de données expérimentale, l'ensemble de test (231 données) et l'ensemble de validation (462 données) soit 5% et 8% de la base de données pour l'ensemble de test et l'ensemble de validation respectivement. Le Tableau IV.1 montre la plage de variables pour le réseau RNA.

Tableau .IV.1 : Plage des variables

<i>Paramètre</i>	<i>Mesure</i>	<i>Unité</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Input				
<i>Concentration</i>	φ	-	0.1	1
<i>Température</i>	T	°C	20	60
<i>Vitesse de cisaillement</i>	γ	S ⁻¹	100	300
Output				
<i>Viscosité Dynamique</i>	η	mPa.s	38.696	266.64

IV.7.2 Evaluation de la performance :

Pour l'étude statistique et afin d'évaluer la performance de ce modèle de réseau de neurones, RNA, développé pour la prédiction de la viscosité dynamique, plusieurs

critères de performance ont été utilisés. L'erreur absolue relative moyenne (*MRAE*), l'erreur quadratique moyenne (*MSE*), le coefficient de corrélation \textcircled{R} , le coefficient de détermination (R^2), le facteur de précision (A_f), le facteur de biais (B_f), l'indice de Wilmot (*WI*), l'indice de Legates-McCabe's (*LMI*) et les critères d'acceptabilité (*K*) et

(*K'*) ont été utilisés comme mesure de précision, exprimés comme suit :

- Erreur absolue relative moyenne (Mean Relative Absolute Error) :

$$MRAE(\%) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y^{exp} - y^{pre}|}{y^{exp}} \right] * 100 \quad (IV.5)$$

- Erreur quadratique moyenne (Mean Square Error) :

$$MSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^{exp} - y^{pre})^2 \right]^{1/2} \quad (IV.6)$$

- Coefficient de corrélation (Correlation Coefficient) :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{pre} - \overline{y^{pre}})(y_i^{exp} - \overline{y^{exp}})}{\left[\sum_{i=1}^n (y_i^{pre} - \overline{y^{pre}})^2 \sum_{i=1}^n (y_i^{exp} - \overline{y^{exp}})^2 \right]^{1/2}} \quad (IV.7)$$

- Coefficient de détermination (Coefficient of Determination) :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{exp} - y_i^{pre})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{exp} - \overline{y^{exp}})^2} \quad (IV.8)$$

- Facteur de précision (Accuracy Factor) :

$$A_f = 10^{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \log \frac{y_i^{pre}}{y_i^{exp}} \right| \right]} \quad (IV.9)$$

- Facteur de biais (Bias Factor) :

$$B_f = 10^{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log \frac{y_i^{pre}}{y_i^{exp}} \right]} \quad (IV.10)$$

- Index de Wilmot (Wilmot's Index) :

$$WI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y^{exp} - y^{pre})^2}{\sum_{i=1}^n [|y_i^{pre} - \overline{y^{exp}}| + |y_i^{exp} - \overline{y^{exp}}|]^2} \quad (IV.11)$$

- Index de Legates-McCabe (Legates-McCabe's Index) :

$$LMI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y^{exp} - y^{pre}|}{\sum_{i=1}^n |y^{exp} - \overline{y^{exp}}|} \quad (IV.12)$$

- Critères d'acceptabilité (Criteria of acceptability) :

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^{pre} y_i^{exp}}{\sum_{i=1}^n y_i^{pre^2}} \quad (IV.13)$$

- Critères d'acceptabilité (Criteria of acceptability) :

$$k' = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^{pre} y_i^{exp}}{\sum_{i=1}^n y_i^{exp^2}} \quad (IV.14)$$

IV.7.3 Résultats numériques et discussion :

En application de l'équation (IV.4) à l'équation (IV.13), le tableau IV.2 résume quelques performances statiques des paramètres du réseau RNA, de la phase de conception du modèle neuronal, c'est-à-dire la phase d'apprentissage, de généralisation, de validation et de l'ensemble de la base de données.

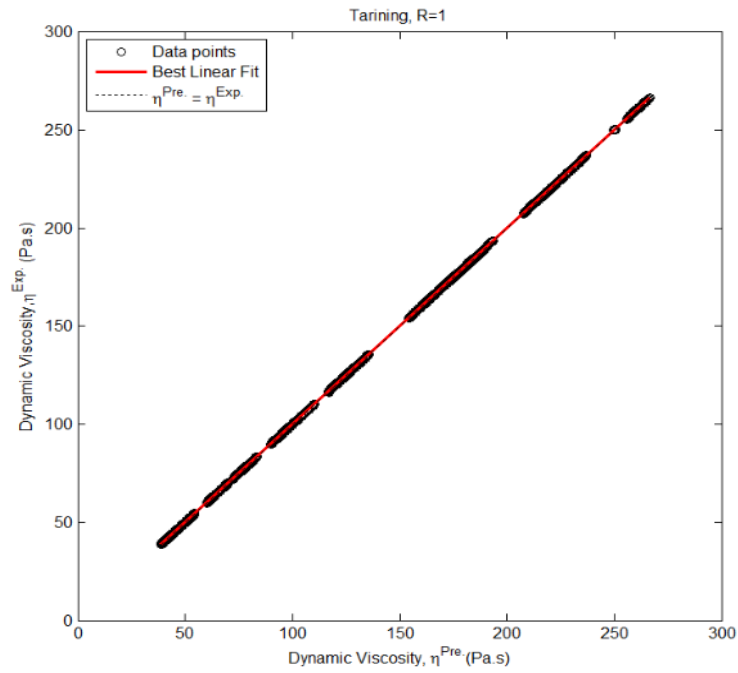
Tableau. IV. 2 : Performance métriques du RNA

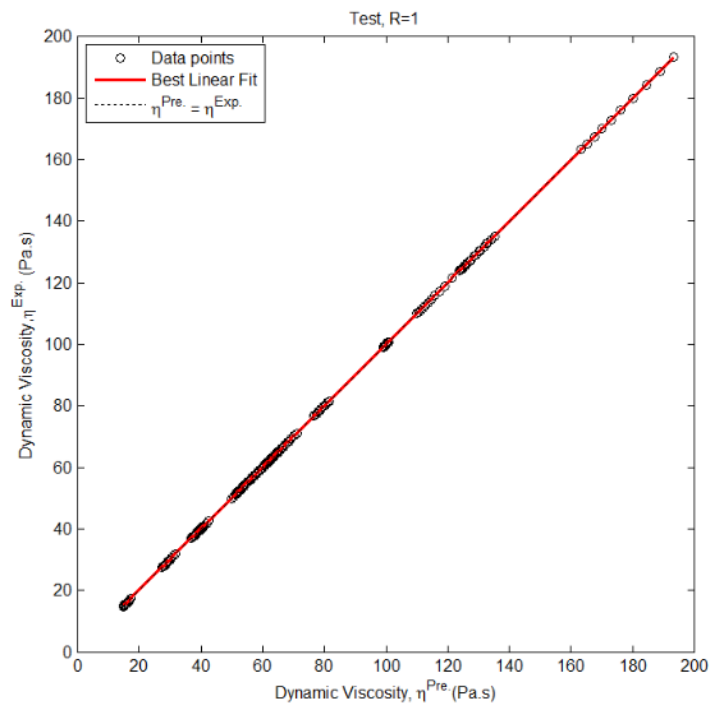
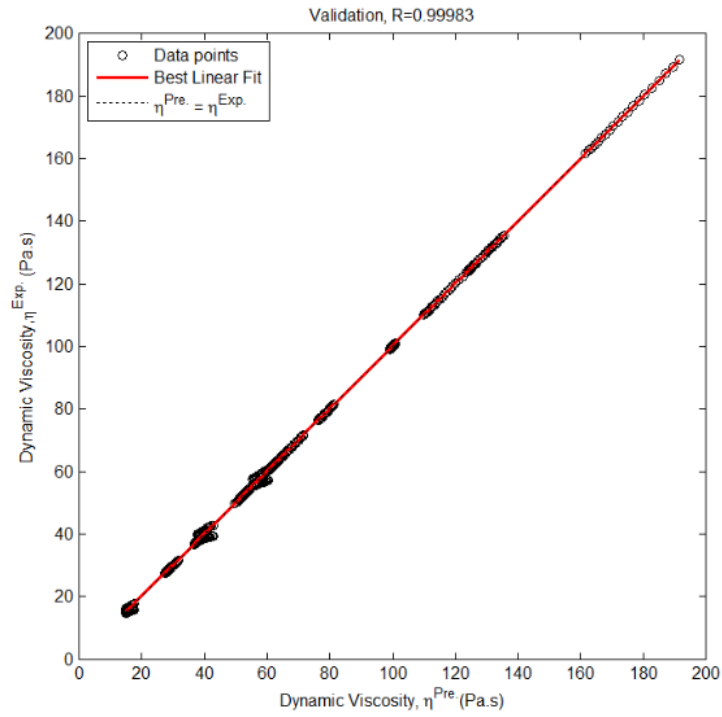
<i>Performance</i>	<i>Apprentissage</i>	<i>Généralisation</i>	<i>Validation</i>	<i>Tout</i>
MRAE%	75.410e-3	11.108e-3	15.398e-6	142.482e-3
MSE	4.854e-3	17e-6	4.021e-6	24.053e-3
R	999.999e-3	1.000	999.958e-3	999.996e-3
R ²	999.998e-3	1.000	999.916e-3	999.991e-3
A _f	1.000	1.000	1.000	1.000
B _f	1.000	1.000	1.000	1.000
WI	1.000	1.000	999.979e-3	999.998-3
LMI	998.879e-3	999.813e-3	995.161e-3	998.558e-3
K	1.000	999.938e-3	999.899e-3	999.997e-3
K'	999.999e-3	1.000	1.000	1.000
Best linear fit				

La figure IV.13 présente les résultats obtenus lors de la phase d'apprentissage et de généralisation du réseau RNA pour la prédiction de la viscosité dynamique, le

CHAPITRE -IV- Modélisation du Comportement Rhéologique du nanofluide $Fe_2O_3/SAE20W40$ par Application des Réseaux de Neurones

coefficient de corrélation R de la courbe de linéarisation est égale à 1 pour la phase de la validation qui est de 0.99983.





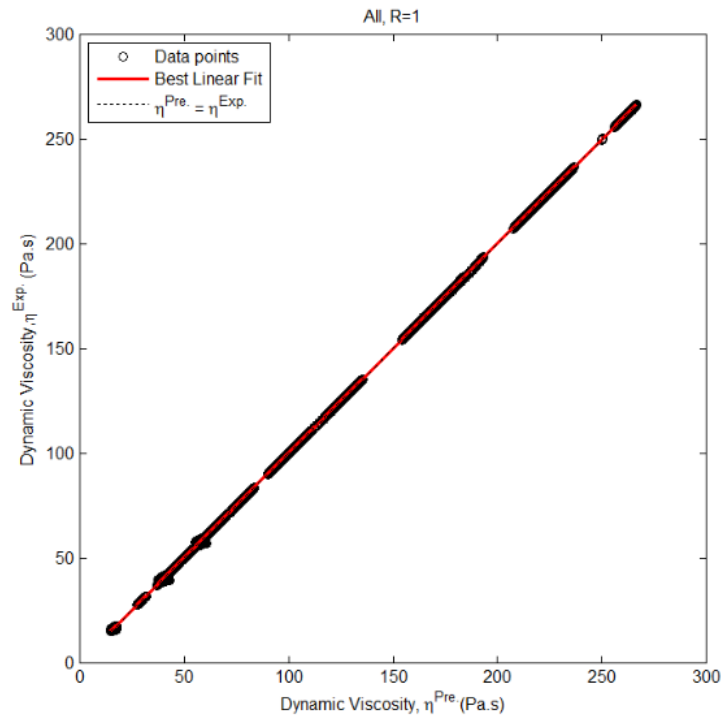


Figure IV.13: Diagramme de régression du réseau de neurones artificiel de la viscosité dynamique η

Tableau .IV.3 : Etude comparative entre le modèle neuronale et expérimentale.

Erreur relative $[(\text{calc} - \text{exp})/\text{exp}] * 100, \%$				
	$\dot{\gamma} (s^{-1})$	viscosité		ER(%)
		Exp	RNA	
T=40°C $\phi = 1\%$	100	104.69	104.602	8.4×10^{-4}
	150	100.93	100.963	3.27×10^{-4}
	200	98.299	98.254	4.58×10^{-4}
	250	96.211	96.253	4.37×10^{-4}
	300	94.748	94.682	6.97×10^{-4}
	$\phi (\%)$	Viscosité		ER(%)
		Exp	RNA	
T=40°C $\dot{\gamma} = 200s^{-1}$	0.1	99.146	99.066	8.07×10^{-4}
	0.25	76.725	76.627	12.77×10^{-4}
	0.50	92.197	92.161	3.90×10^{-4}
	0.75	80.298	80.250	5.98×10^{-4}

**CHAPITRE -IV- Modélisation du Comportement Rhéologique du nanofluide
Fe₂O₃/SAE20W40 par Application des Réseaux de Neurones**

	1	98.299	98.254	4.58 x10 ⁻⁴
	T (°C)	Viscosité		ER(%)
		Exp	RNA	
$\varphi = 1\%$ $\dot{\gamma} = 200s^{-1}$	20	262.69	262.569	4.61 x10 ⁻⁴
	30	173.08	173.283	11.73 x10 ⁻⁴
	40	98.299	98.254	4.58 x10 ⁻⁴
	50	62.34	62.356	2.57 x10 ⁻⁴
	60	44.364	44.256	24.34 x10 ⁻⁴
ERM(%)				7.38 x10 ⁻⁴

IV.7.4 Organigramme du soft :

Parmi les applications les plus évidentes des réseaux neuronaux, est la réalisation d'une application pour la prédiction de la viscosité dynamique η . Ce genre d'application est de grande importance pour les gens qui sont amenés à effectuer des calculs qui, en l'absence de logiciels performants, peuvent s'avérer complexes et consommateurs de temps.

Traditionnellement, l'utilisateur a dû se familiariser avec l'utilisation des tabulations construites à partir des données théoriques. L'emploi de ces tables donne lieu à de fastidieux calculs, souvent très répétitifs, qui détournent l'intérêt du principal.

C'est pour répondre à cette attente que nous avons intégré le réseau neurone déjà validé dans un programme pour faire des calculs complexes précis très facilement et en un minimum de temps. Ce programme permet de prédire rigoureusement la viscosité dynamique.

La figure IV.14 présente l'interface du programme conçue d'une façon conviviale, où s'affichent toutes les données d'entrées à savoir la concentration, la température et la vitesse de cisaillement. Dans la partie inférieure de la fenêtre s'affiche le résultat de la prédiction de la viscosité dynamique, pour son obtention il suffit d'introduire les inputs tout en respectant le domaine de validité du réseau à savoir les valeurs minimales et les maximales de chaque input.

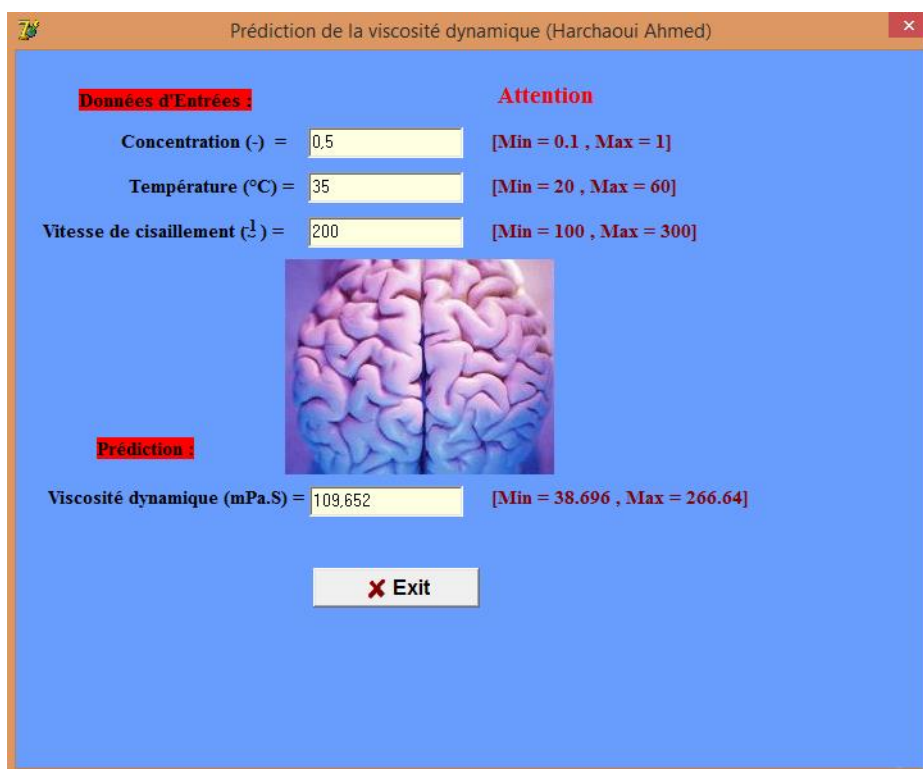


Figure IV. 14: Interface du programme pour la prédiction de la Viscosité dynamique η au moyen des réseaux de neurones artificiels

IV.8 Conclusion :

L'application de la méthode des réseaux de neurones dans les calculs et la prédiction de la viscosité dynamique s'avère bénéfique. La puissance de cette méthode est mise en évidence par la bonne concordance, lors de la comparaison entre les résultats obtenus par les réseaux de neurones et les travaux antérieurs issus de la référence bibliographique et de l'expérience.

Les erreurs commises restent très acceptables, en effet les études comparatives effectuées lors de la confrontation des résultats témoignent de leurs efficacités et de leurs performances.

Suite à ces résultats, nous pouvons présenter ces modèles neuronaux comme des outils fiables et performants pour le calcul de la viscosité dynamique. L'intégration de ces modèles dans un programme informatique en langage Delphi, permettra aux utilisateurs, pour des calculs complexes, leur application avec simplicité et rapidité en un minimum de temps.

Conclusion Générale et perspectives

Le travail présenté dans cette thèse porte sur l'identification des caractéristiques des nano-lubrifiants, le comportement rhéologique des nano-lubrifiants $Fe_2O_3/20W40$, $Al_2O_3/20W40$ et $ZnO/20W40$ a été étudié à différentes températures et pour différentes fractions volumiques solides. Pour réaliser ce travail, divers échantillons avec des fractions volumiques solides de 0,25 % ; 0,50 % ; 0,75 % et 1 % ont été étudiés. La viscosité des échantillons a été mesurée à différentes températures allant de 20°C à 60°C et des taux de cisaillement entre $100 s^{-1}$ à $300 s^{-1}$ avec un rhéomètre modulaire compact MCR302. en plus une étude par réseau de neurones a été réalisé sur le nanofluide $Fe_2O_3/20W40$.

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

1. La viscosité du nanofluide Al_2O_3 /huile était significativement inférieure à celle des nanofluides Fe_2O_3 /huile et ZnO /huile ;
2. L'équation d'Ostwald-de Waele a permis aux chercheurs d'identifier le comportement de rhéofluidification non newtonien des nanofluides Fe_2O_3 /huile et ZnO /huile et le comportement newtonien du nanofluide Al_2O_3 /huile ;
3. Tous les nanofluides étudiés avaient une viscosité qui diminuait avec l'augmentation de la température. La viscosité a diminué d'environ 85 % à des températures allant de 20 °C à 60 °C ;
4. La viscosité des nanofluides Fe_2O_3 /huile et ZnO /huile est augmentée par l'augmentation de la concentration en nanoparticules solides.
5. Pour le nanofluide Al_2O_3 , la viscosité dynamique a diminué à de faibles fractions volumiques (inférieures à 0,5 %) mais a augmenté à des fractions volumiques supérieures à 0,5 %,
6. A haute température, l'effet de la fraction volumique solide devient négligeable par rapport à celui de la température,
7. La puissance de cette méthode est mise en évidence par la bonne concordance, lors de la comparaison entre les résultats obtenus par les réseaux de neurones et les travaux antérieurs issus de la référence bibliographique et de l'expérience.

On peut confirmer que les objectifs principaux visés ont été atteints. Des études complémentaires sont bien évidemment nécessaires.

Donc, nous pouvons mentionner que d'autres recherches théoriques et expérimentales sont nécessaires afin d'être en mesure d'utiliser les nanofluides pour l'amélioration de la viscosité, Ces résultats sont très importants car le nanofluide reste une technologie assez récente et non maîtrisée parfaitement, et l'une des clés du futur succès de cette technologie réside dans le contrôle de l'agglomération et de la stabilité du mélange. Il y a donc une véritable technique de maintenance de la stabilité à développer pour que le nanofluide peut conserver ainsi ces propriétés thermophysiques. Et l'une des clés du futur succès de cette technologie réside dans le contrôle de l'agglomération et de la stabilité du mélange.

Références Bibliographiques

- [1] Mouassi, A.: Intensification des échanges de chaleur par l'utilisation des nanofluides, Thèse de Magister en Génie Mécanique, Mécanique des Fluides et Transfert de Chaleur, Université M'Hamed Bougara Boumerdes(2012)
- [2] Bang, I., C., Chang, S., H.: boiling heat transfer performance and Phenomena of Al₂O₃- Water nanofluids from a plan surface in a pool, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 2407-2419.(2005)
- [3] H. Sakuma, K. Ishii. Gas flow sputtering: Versatile process for the growth of nanopillars, nanoparticles, and epitaxial thin films. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 321. 872-875.(2009)
- [4] Y. Singh, J.R.N. Javier, S. H. Ehrman, M. H. Magnusson, K. Deppert. Approaches to increasing yield in evaporation / condensation nanoparticle generation; Journal of Aerosol Science 33 -1309-1325.(2002)
- [5] D. K. Lee, Y. H. Kim, X. L. Zhang, Y. S. Kang. Preparation of monodisperse Co and Fe nanoparticle using precursor of M²⁺-oleate₂ (M = Co, Fe). Current Applied Physics 6- 786-790.(2006)
- [6] R. Benoit, F. Warmont, V. Meynen, K. De Witte, P. Cool, M. T. Delapierre , M-L.Saboungi. Optimisation of the surface properties of SBA-15 mesoporous silica for in-situ nanoparticle synthesis. Microporous and Mesoporous Materials 120- 2-6.(2009)
- [7] Ribeiro J., P., Gruss J., A. : Nanofluides pour les applications thermiques, technique de l'ingénieur, 2e édition.(2009)
- [8] D.Zheng,J.WangandZ.Chenetal./ process of nanofluid preparation ,InternationalJournalofHeatandMassTransfer158-119993.(2020)

- [9] Pak, B., C., et Cho, Y., I.: Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, vol. 11, pp. 151–170.(1998)
- [10] Xuan, Y., et Roetzel, W.: Conception for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, pp. 3701-3707.(2000)
- [11] Maxwell JCA. *Treatise on electricity and magnetism*. Oxford, UK: Clarendon Press; 1881.
- [12] Hamilton RL, Crosser OK. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *I&EC Fundamentals*; 1(3):187–91.1962.
- [13] W. Yu, SUS. Choi. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *J. nanoparticle Res*5: 167-71, 2003.
- [14] Einstein A. Eine neue bestimmung der molekul dimensionen. *Annalen der Physik*, Leipzig;19:289–306.1906
- [15] Brinkman HC. The viscosity of concentrated suspensions and solution. *Journal of Chemical Physics*;20:571–81.1952
- [16] Batchelor GK. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics*;83(1): 97–117.1977
- [17] Murshed S.M.S ,K.C Leong,C Yang, Investigation of Thermal Conductivity and Viscosity of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 47-560-568(2008)
- [18] A. Einstein. *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. Dover Publications, New York, 1956.
- [19] H.C. Brinkman. The viscosity of concentrated suspensions and solution. *J. Chem. Phys.*, 20, 571–581, 1952

- [20] G.K. Batchelor. Brownian Diffusion of particles with Hydrodynamic Interaction. *Journal of Fluid Mechanics*, 74(1): 1-29, 1976.
- [21] S. Maiga, S. Palm, S. Nguyen, C. Roy, and G. Galanis. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 26, 530-546, 2005.
- [22]. *Gladés Bachir Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard L'Université de Toulouse III- Paul Sabatier page 55*
- [23] Devdatta P. Kulkarni, Debendra K. Das *, Ravikanth S. Vajjha., "Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution", *Applied Energy* 86 2566–2573.(2009)
- [24] Buongiorno, J., Hu, L. W., Apostolakis, G., Hannink, R., Lucas, T., and Chupin, A., , "A feasibility assessment of the use of nanofluids to enhance the in-vessel retention capability in lightwater reactors," *Nucl. Eng. Des.*, 239(5), pp. 941–948. 2009
- [25] Otanicar, T.P., Phelan, P.E., Prasher, R.S., Rosengarten, G., and Taylor, R.A., , "Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Collector," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2(3). 2010
- [27] Hammadi L . : *Cours Rhéologie des fluides complexes : Chapitre 2 : Fluides Non-Newtoniens*. Université des Sciences et Technologie Mohamed Boudiaf. Oran. 2013
- [28] Das SK, Putra N, Roetzel W. Pool boiling characteristics of nano-fluids. *Int J Heat Mass Transf*;46(5):851–62. 2003
- [29] He Y, Jin Y, Chen H, Ding Y, Cang D, Lu H. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *Int J Heat Mass Transf*;50(11):2272–81. 2007

- [30] Pastoriza - Gallego MJ, Casanova C, Legido JL, Piñeiro MM. CuO in water nanofluid: influence of particle size and poly dispersity on volumetric behaviour and viscosity. *Fluid Phase Equilibria*;300(1):188–96.2011
- [31] Namburu PK, Kulkarni DP, Dandekar A, Das DK. Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids. *Micro Nano Lett, IET*;2(3):67–7.2007
- [32] Syam Sundar L, Singh MK, Sousa A. Investigation of thermal conductivity And viscosity of Fe₃O₄ nanofluid for heat transfer applications. *Int Commun Heat Mass Transf*;44:7–14.2013
- [33] Abareshi M, Sajjadi SH, Zebarjad SM, Goharshadi EK. Fabrication, characterization, and measurement of viscosity of α -Fe₂O₃-glycerol nanofluids. *J Mol Liq*;163(1):27–32.2011
- [34] Hung, YH, Chou, WC. Chitosan for suspension performance and viscosity of MWCNTs, 3(5); 2012.
- [35] Nabeel Rashin M, Hemalatha J. Viscosity studies on novel copper oxide–Coconut oil nanofluid. *Exp Therm Fluid Sci*;48:67–72.2013
- [36] Namburu PK, Kulkarni DP, Misra D, Das DK. Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. *Exp Therm Fluid Sci*;32(2):397–402.2007
- [37] Saeedinia M, Akhavan-Behabadi MA, Razi P. Thermal and rheological characteristics of CuO–Base oil nanofluid flow inside a circular tube. *Int Commun Heat Mass Transf*;39(1):152–9.2012
- [38] Murshed SMS, Leong KC, Yang C. Investigations of thermal conductivity And viscosity of nanofluids. *Int J Therm Sci*;47(5):560–8.2008
- [39] Manikandan S, Shylaja A, Rajan KS. Thermo-physical properties of Engineered dispersions of nano-sand in propylene glycol. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp*;449:8–18.2014

- [40] Suganthi KS, Radhakrishnan AK, Anusha N, Rajan KS. Influence of Nanoparticle Concentration on Thermo-Physical Properties of CuO-Propylene Glycol Nanofluids. *J Nanosci Nanotechnol*;14(6):4602–7.2014
- [41] Yu W, Xie H, Chen L, Li Y. Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid. *Thermochim Acta* ;491(1):92–6. 2009
- [42] Abareshi, M., et al.: Fabrication, characterization, and measurement of viscosity of α -Fe₂O₃-glycerol nanofluids. *J. Mol. Liq.* 163(1), 27–32 (2011)
- [43] Thomas, S., Sobhan, C.B.P.: A review of experimental investigations on thermal phenomena in nanofluids. *Nanoscale Res. Lett.* 6(1), 1–21 (2011)
- [44] Suganthi KS, Rajan KS. Temperature induced changes in ZnO – water nanofluid: zeta potential, size distribution and viscosity profiles. *Int J Heat Mass Transf*;55(25):7969–80.2012
- [45] Turgut A, Tavman I, Chirtoc M, Schuchmann HP, Sauter C, Tavman S. Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO₂ nanofluids. *Int J Thermophys*;30(4):1213–26.2009
- [46] M.H. Esfe, et al., An experimental study on viscosity of alumina-engine oil: Effects of temperature and nanoparticles concentration, *Int. Commun. Heat Mass Transf*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.013>.(2016)
- [47] M. Hemmat Esfe et al. / *International Communications in Heat and Mass Transfer* 82 -97–102(2017)
- [48] Th. Yiamsawas, A.S. Dalkilic, O. Mahian, S. Wongwises, Measurement and correlation of the viscosity of water-based Al₂O₃ and TiO₂ nanofluids in high temperatures and comparisons with literature reports, *J. Dispers. Sci. Technol.* 34- 1697–1703. (2013)

- [49] M. Chandrasekar, S. Suresh, A. Chandra Bose, Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 34 (2010) 210–216.
- [50] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, and N. Hishinuma. Alteration of Thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing Ultra-fine Particles (dispersion of Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ Ultra-fine particles). *Netsu Bussei* (Japan), 7(4): 227-233, 1993.
- [51] S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel. Temperature depended of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *Journal of Heat transfer transaction of the ASME*, 125(4): 567-574, 2003.
- [52] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, and F. Ai. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *Journal of Applied Physics*, 91 (7): 4568-4572, 2002.
- [53] I.colla et al Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per le Tecnologie della Costruzione, Corso Stati Uniti, 4, 35127 Padova, Italy
- [54] N.I.Zouli et al Materials for Energy, Efficiency and Sustainability: TechConnect Briefs 2017
- [55] Nishant kumar et al <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.09.009>
- [56] H. Li, L. Wang, Y. He, Y. Hu, J. Zhu, B. Jiang, Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids, *Appl. Therm. Eng.* 10 (071) (2014).
- [57] J. Jeong, Li Chengguo, Y. Kwon, J. Lee, S. Hyung Kim, R. Yun, Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids, *Int. J. Refrig.* 36 (2013) (2233-224).
- [58] M. Asadi, A. Asadi, Dynamic viscosity of MWCNT/ZnO–engine oil hybrid nanofluid: An experimental investigation and new correlation in different

- temperatures and solid concentrations, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 76 (2016) 41–45.
- [59] Mohammad Hemmat Esfe, Experimental investigation, model development and sensitivity analysis of rheological behavior of ZnO/10W40 nano-lubricants for automotive applications, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2017.02.015>
- [60] Tsai C.Y, H.T Chien, P.P Ding, T.Y Luh, P.H Chen, Effect of Structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, *Material letters* 58-1461-1465. (2004)
- [61] Mah.B, C Wilsson, B Borgmeyer, K Park, Q Yu, S.U.S Choi, M Tirumala, Effect of Nanofluid on the Heat Transport Capability in a oscillating heat pipe, *Applied physics letters* 88(14) 143116. (2006)
- [62] You S.M, J.H kim and K.H Kim, Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer. *Applied Physics Letters* 83:pp.3374-3376. (2003)
- [63] Sorin, F., L. Broussard, P. Roblin. Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones, *Techniques de l'Ingénieur, traité Informatique industrielle*. (2001)
- [64] Jayet, A.. Affective Computing: Apport des Processus Emotionnels aux Systèmes Artificiels. Site, www.grappa.univ-lille3.fr/~torre/Recherche/Encadrement/Jayet2003/#sdfootnote10anc. (2002)
- [65] Dreyfus G., Martinez J-M., Samuelides M., Gordon M.B., Badran F., Thiria SS., Hérault L, Réseaux de neurones : Méthodologie et Applications, Eyrolles, 2002.
- [66] Bishop C., *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press, 1995.

- [67] G. Scalabrin, P. Marchi, P. Stringari, D. Richon, Thermal conductivity for pure fluids in a heuristic extended corresponding states framework. I. Modeling techniques, *Fluid Phase Equilib.* 242 -72–78. (2006)
- [68] G. Scalabrin, P. Marchi, P. Stringari, D. Richon, Thermal conductivity for pure fluids in a heuristic extended corresponding states framework. II. Application to two fluids, *Fluid Phase Equilib.* 242 -79–92. (2006)
- [69] H. Kurt, M. Kayfeci, Prediction of thermal conductivity of ethylene glycol–water solutions by using artificial neural networks, *Appl. Energy* 86 - 2244–2248. (2009)
- [70] M.M. Papari, F. Yousefi, J. Moghadasi, H. Karimi, A. Campo, Modeling thermal conductivity augmentation of nanofluids using diffusion neural networks, *Int. J. Therm. Sci.* 50 -44–52. (2011)
- [71] M. Hojjat, S.G. Etemad, R. Bagheri, J. Thibault, Thermal conductivity of non-Newtonian nanofluids: experimental data and modeling using neural network, *Int. J. Heat Mass Transfer* 54 -1017–1023. (2011)
- [72] F. Yousefi, H. Karimi, M.M. Papari, Modeling viscosity of nanofluids using diffusional neural networks, *J. Mol. Liq.* 175- 85–90. (2012)