

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et La Recherche Scientifique



Mémoire

Présenté à

L'Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana
Faculté des Sciences et de la Technologie

Par

REGAD Fethi

Et

SAMET Hamza

Pour obtenir le diplôme de
Master en génie mécanique

« Spécialité : Energétique »

THÈME

«Etude numérique et expérimentale de la viscosité des huiles de moteurs multigrades»

Encadré par

Dr. MAZOUZI Ridha

Année universitaire : 2019/2020

Remerciement

Remerciement

Remerciements et louanges à ALLAH, qui nous a donné la foi et la force pour accomplir ce modeste travail. Prière et salut sur notre prophète Mohammed et sur sa famille et ses compagnons.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Dr. MAZOUZI Ridha de l'université de Khemis Miliana de nous avoir encadré durant notre projet de fin d'étude et nous conseillé tout au long de notre travail.

Nous remercions également les membres du jury, qui ont eu l'amabilité d'examiner notre projet et d'évaluer son contenu. Nous remercions aussi le chef de département des sciences et de la technologie ainsi que tous les enseignants pour les connaissances qu'ils nous ont transmises. Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce travail ...

À Ma mère et mon père où je trouve ma force

À mes frères et à mes sœurs pour leur patience

À toute ma famille et à tous mes amis

À mon frère Anes

À mon binôme Hamza SAMET

À mes amis : Amer, Djelleul, Abd El Kader, Hassan, Billel

Fethi

Dédicace

Je dédie ce travail...

À Ma mère et mon père où je trouve ma force

À mes frères et à mes sœurs pour leur patience

À toute ma famille et à tous mes amis

Hamza

Tables des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Partie I Synthèse bibliographique	6
Chapitre I Généralités sur les lubrifiants	7
I.1 Introduction	8
I.2 Rôles des lubrifiants	8
I.3 Composition des huiles lubrifiantes	9
I.3.1 Les huiles de base	10
I.3.1.1 Les bases minimales	10
I.3.1.2 Les bases synthétiques	10
I.3.1.3 Les bases semi-synthétiques	10
I.3.2 Les additifs	11
I.3.2.1 Additifs améliorant de viscosité	11
I.3.2.2 Les additives anti-usures	11
I.3.2.3 Les additifs antioxydants	11
I.3.2.4 Les additifs détergents	11
I.3.2.5 Les additifs dispersants	11
I.3.2.6 Les additifs de basicité	12
I.3.2.7 Les additifs anticorrosion	12
I.3.2.8 Les additifs anti-congélation	12
I.3.2.9 Les additifs anti-mousses	12
I.3.2.10 Les additifs d'extrême pression	12
I.4 Types des lubrifiants	12
I.4.1 Les huiles monogrades	12

Tables des matières

I.4.2	Les huiles multigrades	13
I.5	Propriétés physiques des huiles de lubrification	13
I.5.1	Densité	13
I.5.2	Point d'éclair	13
I.5.3	Couleur :	14
I.5.4	Capacité thermique massique	14
I.5.5	Conductivité thermique	14
I.5.6	Onctuosité	14
I.6	Propriétés rhéologique des huiles de lubrification	14
I.6.1	Viscosité	14
I.6.2	Point d'écoulement.....	15
I.6.3	Pompabilité	15
I.6.4	Filtrabilité	15
I.7	Conclusion	16
Chapitre II Notion de base de la viscosité		Error! Bookmark not defined.
II.1	Introduction.....	18
II.2	Concept de la viscosité	18
II.2.1	La contrainte de cisaillement	19
II.2.2	La déformation de cisaillement.....	19
II.2.3	Le taux de cisaillement	19
II.2.4	La viscosité dynamique	19
II.2.5	La viscosité cinématique	20
II.3	Relation viscosité-température.....	20
II.4	Index (ou indice) de viscosité	21
II.5	Relation viscosité-pression	22
II.6	Relation viscosité-taux de cisaillement	23
II.7	Types de fluide en fonction de la viscosité.....	24

Tables des matières

II.7.1	Fluides newtoniens	24
II.7.2	Fluides non newtoniens	25
II.7.2.1	fluides rhéofluidifiants.....	25
II.7.2.2	Fluides rhéo-épaississants.....	26
II.7.2.3	Fluides à contrainte seuil	26
II.8	Techniques de mesure de la viscosité.....	27
II.8.1	Les viscosimètres à capillaire	27
II.8.2	Viscosimètre à cylindres rotatifs.....	28
II.8.3	Viscosimètre à chute de bille	30
Partie II Etude numérique.....		Error! Bookmark not defined.
Chapitre III Etude numérique		Error! Bookmark not defined.
III.1	Introduction.....	33
III.2	Organigramme	33
III.3	Programme viscosité	35
III.4	Description du programme	37
III.5	Liste des variables	37
III.6	Exemple d'exécution :.....	38
Partie III Expérimentale.....		39
Chapitre IV Etude expérimentale		40
IV.1	Introduction.....	41
IV.2	Présentation de huile SAE 20W50	41
IV.3	Description du rhéomètre	41
IV.4	Déroulement des essais.....	45
IV.4.1	Démarrage et initialisation.....	45
IV.4.2	Variation de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement.....	45
IV.4.4	Effet de la température sur la viscosité apparente.....	46
Partie IV Résultats et discussion		47

Tables des matières

Chapitre V	résultats et discussions	48
V.1	Introduction.....	49
V.2	Résultats numériques.....	49
V.3	Résultats expérimentaux.....	50
V.3.1	Variation de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement.....	50
V.3.2	Effet de la température sur la viscosité apparente.....	51
V.4	Comparaison résultats expérimentaux - modèle de Reynolds :	52
Conclusion générale		
Références bibliographiques		

Liste des figures

Figure I.1: Fonctions principales d'un lubrifiant moteur. 9

Figure I.2 : Principe de composition d'une huile. 10

Figure II.1 : Le concept de la viscosité. 188

Figure II.2 : Evolution de la viscosité d'une huile en fonction de la température. 20

Figure II.3: diagramme de l'indice de viscosité.....22

Figure II.4 : Variation de la viscosité avec le taux de cisaillement. 23

Figure II.5 : Rhéogramme d'un fluide newtonien. 24

Figure II.6 : Rhéogramme d'un fluide non newtonien. 25

Figure II.7 : (a) Fluide rhéofluidifiant. (b) Fluide Newtonien. (c) Fluide rhéo-
épaississant. (d) Fluide à contrainte seuil. 27

Figure II.8: schéma générale d'un viscosimètre à tube capillaire. 27

Figure II.9: schéma de viscosimètre de Couette. 29

Figure II.10: viscosimètre à chute de bille. 30

Figure III.1: organigramme de résolution de l'équation de Vogel. 34

Figure III.2: Interface d'affichage des résultats. 38

Figure IV.1: Rhéomètre Anton Paar MRC 302. 42

Figure IV.2 : principe de fonctionnement du rhéomètre. 42

Figure IV.3 : Différentes géométries de mesure (a) plan-plan, (b) cône-plan, (c)
cylindres coaxiaux, (d) double entrefer. 43

Figure IV.4 : Vue schématique d'un rhéomètre à cylindre concentrique. 44

Figure V.1 : Variation de la viscosité en fonction de la température 49

Figure V.2 : Variation de la viscosité apparente en fonctions du taux de cisaillement à
différentes températures 50

Figure V.3 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de
cisaillement à différentes températures. 51

Figure V. 4 : Régression linéaire des résultats expérimentaux pour l'huile SAE 20W50 à
un taux de cisaillement de 75 s^{-1} 51

Tableau V.5 : Paramètres caractéristiques de la variation de la viscosité en fonction de
la température du modèle de Reynolds 52

Figure V.6 : Comparaison des résultats expérimentaux avec ceux du modèle de
Reynolds de l'huile SAE 20W50 à 75 s^{-1} 53

Liste des tableaux

Tableau II.1: les unités de la viscosité et le taux de cisaillement. 20

Tableau II.2 : Equations viscosité-température. 21

Tableau V.1 : Résultats numériques de la variation de la viscosité en fonction de
température. 49

Tableau V.2 : Paramètres caractéristiques de la variation de la viscosité en fonction de
la température du modèle de Reynolds 53

Introduction générale

Les développements dans la construction automobiles et dans la technique des moteurs sont liés de façon indissociable avec des performances des huiles moteurs, plus les moteurs ont une conception compliquée, plus le rendement et l'optimisation de la consommation sont élevés et plus l'huile moteur est sollicitée et doit aller aux limites de ses performances.

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

La sélection d'un lubrifiant est très importante pour garantir une vie plus longue des mécanismes et des machines. Pour faire une sélection appropriée d'un lubrifiant, il est nécessaire de connaître ses propriétés. Parmi ces propriétés : la viscosité, l'indice de viscosité, la densité, la compressibilité, point de trouble, point d'écoulement, point d'éclair, coefficient de frottement, etc... La propriété la plus importante est la viscosité. La viscosité est une fonction de la température. La relation entre la viscosité et la température est également importante pour la rhéologie du lubrifiant ainsi que pour la durée de vie des éléments de machine. Pour comprendre les performances d'une huile lubrifiante l'étude de cette relation est devenue un paramètre important, en particulier dans les applications à haute température, de sorte que la mesure de la viscosité devient un outil important pour le faire.

Le travail réalisé dans le cadre de ce projet de fin d'étude a comme objectif d'étudier numériquement et expérimentalement la variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement et de la température. Cette étude concerne l'huile moteur multigrade : SAE 20W50.

Ce mémoire comporte cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, nous définirons le rôle d'une huile moteur lubrifiante, ainsi que sa composition, ces types et ces caractéristiques.

Le chapitre 2 portera essentiellement sur la notion de la viscosité : définition et présentation des différents paramètres influençant la viscosité tels que : la température, la pression et le taux de cisaillement. Ensuite, on définit les types de fluide et

d'écoulement en fonction de la viscosité. Les techniques de mesure de la viscosité sont aussi abordées.

Dans le troisième chapitre, un programme numérique codé en Fortran est présenté. Ce programme permet de déterminer la viscosité à une température donnée, ou bien déterminer la température pour une viscosité donnée.

Le chapitre 4 est consacré à la présentation de huile moteur utilisée, ainsi qu'une description du rhéomètre employé pour réaliser les mesures. Le déroulement des essais est aussi présenté avec détaille.

Le cinquième chapitre regroupe les résultats obtenus qui sont également discutés.

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

Résumé

La rhéologie des fluides et en particulier les huiles lubrifiantes est la science qui nous permet de mieux comprendre le comportement de ces fluides. Ce travail porte sur une étude numérique et expérimentale d'une huile multigrade SAE 20W50. L'influence de la température sur la viscosité a été étudiée à partir d'une programmation numérique, et on effectuant une série de mesures expérimentales sur Rhéomètre. Les résultats de cette étude montrent que la viscosité diminue avec l'augmentation de la température avec une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et le modèle de Reynolds.

Mots clés : Huile lubrifiante, Rhéologie, Viscosité, Température, Taux de cisaillement.

Abstract

The rheology of fluids and in particular of lubricating oils is the science which allows a better understanding of the behavior of these fluids. This work concerns a numerical and experimental study of an SAE 20W50 multigrade oil. The influence of temperature on viscosity was studied from digital programming, and a series of experimental measurements were performed on a rheometer. The results of this study show that the viscosity decreases with increasing temperature with a good agreement between the experimental results and the Reynolds model.

Key-words: Lubricating oil, rheology, viscosity, temperature, rate of shear.

ملخص

إن ريولوجيا السوائل وخاصة زيوت التشحيم هو العلم الذي يسمح لنا بفهم سلوك هذه السوائل بشكل أفضل. يتعلق هذا العمل يتوقف على دراسة رقمية و تجريبية لزيت متعدد الدرجات SAE 20W50 , تمت دراسة تأثير درجة الحرارة على اللزوجة من خلال البرمجة الرقمية ، وأجريت سلسلة من القياسات التجريبية على مقياس ريومتر. أظهرت نتائج هذه الدراسة أن اللزوجة تقل مع زيادة درجة الحرارة مع توافق جيد بين نتائج التجربة وأنموذج رينولدز.

الكلمات المفتاحية : زيت التشحيم، ريولوجيا، اللزوجة، درجة الحرارة، معدل القص.

Partie I

Synthèse bibliographique

CHAPITRE I
GENERALITES SUR
LES LUBRIFIANTS

I.1 Introduction

Ce chapitre consiste à présenter quelques généralités sur les huiles lubrifiantes qui sont plus utilisées actuellement dans divers domaines de lubrification, soit dans les moteurs thermiques ou bien d'autres machines. La lubrification est une opération importante pour le bon fonctionnement des mécanismes, elle a pour objectif de superposer un film de lubrifiant entre les pièces en mouvement relatif, afin de réduire la résistance au glissement provoquant l'échauffement et éviter l'usure des éléments en contact métal/métal entre partie mobiles. Elle est assurée soit par des lubrifiants solides, liquides ou gazeux.

I.2 Rôles des lubrifiants

Les lubrifiants ont plusieurs fonctions principales :

- Réduire les frottements dans les machines et par conséquent économise l'énergie et diminuent les résistances dues aux frottements et limitent l'usure des pièces en mouvement. Ils assurent donc la tenue mécanique des mécanismes. [1]
- Refroidir les machines en évacuant la chaleur produite dans le contact.
- Nettoyage des surfaces et des circuits en évacuant les produits indésirables (poussières, débris d'usure, ...).
- Protection contre l'oxydation et la corrosion

La figure (I.1) montre un schéma simplifié pour expliquer le rôle d'un lubrifiant.

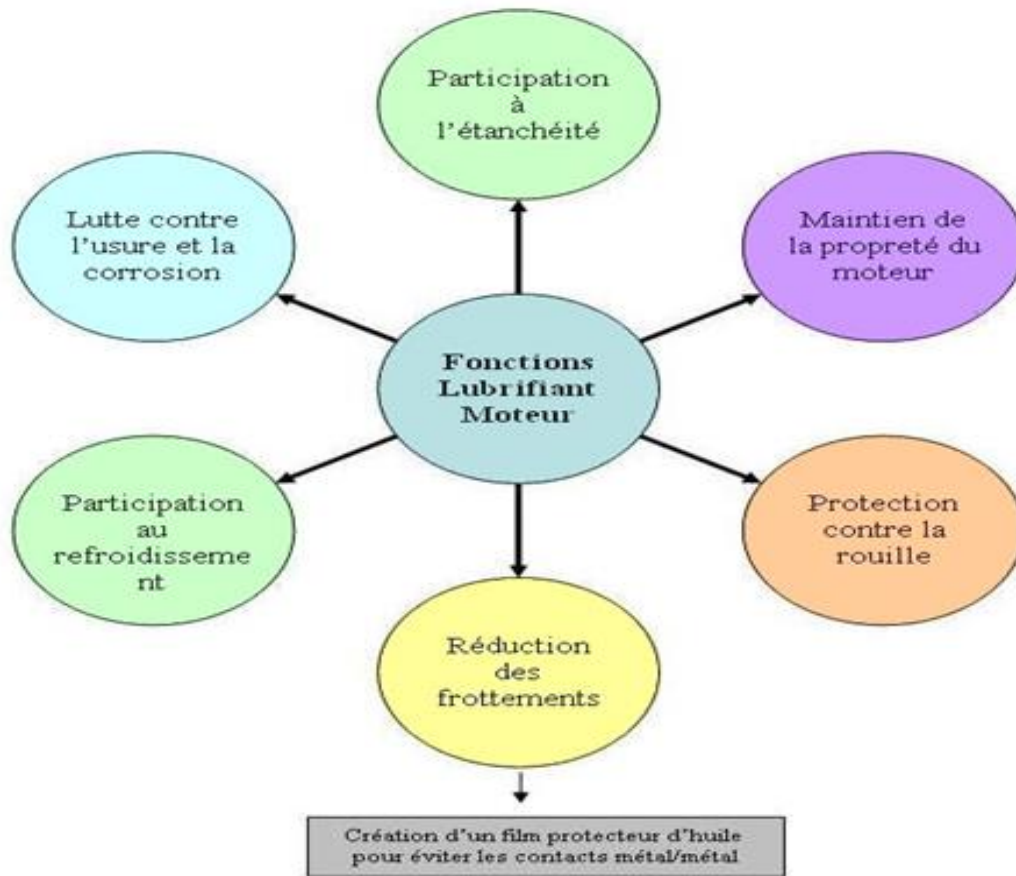


Figure I.1: Fonctions principales d'un lubrifiant moteur.

I.3 Composition des huiles lubrifiantes

Les lubrifiants moteurs possèdent des propriétés et des caractéristiques très variées qui diffèrent le plus souvent entre un moteur Diesel et un moteur à essence. D'une façon générale, dans le domaine de la lubrification on trouve que la plupart des huiles utilisés sont constitués d'un composant principal appelé "fluide de base" et un certain pourcentage d'additifs ou "synthétique" de performances.

La figure I.2 illustre un schéma simplifié pour expliquer le principe de composition d'une huile lubrifiante.



Figure I.2 : Principe de composition d'une huile. [2]

I.3.1 Les huiles de base

Les huiles de base les plus utilisées sont d'origine minérale extraite du pétrole ou d'origine synthétique et représentent 75 à 85% du lubrifiant. Elles sont divisées en trois classes comme suit :

I.3.1.1 Les bases minimales

Conventionnelles sont aujourd'hui encore les bases les plus utilisées dans la fabrication des lubrifiants, sont essentiellement obtenues directement à partir du fractionnement du pétrole brut. Elles se composent principalement d'hydrocarbures saturés, paraffines et naphènes, ainsi que d'hydrocarbures insaturés, les aromatiques. Ces huiles offrent de bonnes performances à froid grâce aux paraffines ainsi qu'un bon pouvoir solvant et de bonnes propriétés rhéologiques. [3]

I.3.1.2 Les bases synthétiques

En général, Les bases synthétiques sont obtenues par synthèses chimiques telles que la polymérisation ou l'addition d'un produit sur un autre (estérification, alkylation...). Les bases synthétiques offrent des propriétés rhéologiques supérieures aux bases minérales et une bonne résistance à l'oxydation.

I.3.1.3 Les bases semi-synthétiques

Sont un mélange dans des proportions variables d'huile minérale et d'huile de synthèse. Ce sont les plus courantes.

I.3.2 Les additifs

Les additifs sont utilisés pour renforcer certaines propriétés des huiles de base, on y ajoute ces additifs aux lubrifiants afin de modifier ou d'améliorer leurs propriétés naturelles et de leur conférer des propriétés qu'ils n'ont pas de façon naturelle. Ils présentent environ 25% de la masse totale de l'huile utilisée.

Les principaux additifs sont présentés brièvement ci-dessous [6]

I.3.2.1 Additifs améliorant de viscosité

Ils permettent à l'huile d'être suffisamment fluide à froid et visqueuse à chaud pour éviter le contact direct des pièces en mouvement. Ce sont des polymères introduits dans une base lubrifiante. Une huile contenant ces additifs est dite multigrade. Les polymères à longue chaîne se contractent à basse température et n'offrent ainsi qu'une résistance négligeable au mouvement des molécules d'huile mais, à haute température, ils se déroulent et s'opposent à la fluidification du mélange.

I.3.2.2 Les additives anti-usures

Ils renforcent l'action anti-usure qu'exerce un lubrifiant vis-à-vis des organes qu'il lubrifie. Ils agissent en formant un film protecteur, en réagissant directement ou par l'intermédiaire de leur produit de réaction avec les surfaces lubrifiées.

I.3.2.3 Les additifs antioxydants

Ils ralentissent les phénomènes d'oxydation du lubrifiant et contribuent à l'espacement des vidanges par une meilleure tenue aux hautes températures.

I.3.2.4 Les additifs détergents

L'objectif est de garder les surfaces chaudes propres et exemptes de dépôts, principalement les pistons et les segments dans le cas des moteurs. Pour ce faire, l'additif réagit avec les éléments constitutifs des boues et dépôts afin de les neutraliser et les garder en suspension soluble dans le lubrifiant. Les détergents sont habituellement utilisés dans les lubrifiants pour moteurs et occasionnellement, dans ceux pour transmissions manuelles et automatiques.

I.3.2.5 Les additifs dispersants

Ils maintiennent en suspension toutes les impuretés solides formées au cours de fonctionnement du moteur thermique : imbrûlés, gommes, boues, suies Diesel, dépôts nettoyés par les détergents. Ils empêchent les résidus solides de s'agglomérer et ainsi limitent le risque de dépôt (boues) dans les parties froides du moteur (carter).

I.3.2.6 Les additifs de basicité

Ils neutralisent les résidus acides de combustion des carburants, principalement sur moteur Diesel, au fur et à mesure de leur formation.

I.3.2.7 Les additifs anticorrosion

Ils empêchent l'attaque des métaux ferreux, attaque due à l'action conjuguée de l'eau, de l'oxygène de l'air et de certains oxydes formés lors de la combustion. Ils forment un film protecteur ou une passivation de la surface à protéger.

I.3.2.8 Les additifs anti-congélation

Ils permettent au lubrifiant de garder une bonne fluidité à basse température (de -15°C à -45°C).

I.3.2.9 Les additifs anti-mousses

Dans la plupart des applications, les lubrifiants sont agités, ce qui provoque la formation de bulles d'air et de mousse, un moussage de l'huile peut être dû à la présence d'autres additifs (les additifs détergents agissent dans l'huile comme du savon dans l'eau : ils nettoient le moteur mais ont tendance à mousser). Alors on doit utiliser les additifs anti-mousse qui réduisent le moussage en diminuant la tension de surface du fluide et en facilitant la séparation des bulles de la phase liquide.

I.3.2.10 Les additifs d'extrême pression

Ils ont pour but de réduire les couples de frottement et par conséquence économiser l'énergie et de protéger les surfaces des fortes charges. Ils apportent au lubrifiant des propriétés de glissement spécifiques, en particulier aux organes équipés d'engrenages ou de garnitures de friction travaillant dans l'huile (ponts auto bloquants, boîtes de vitesse : manuelles ou automatiques, freins immergés, etc.).

I.4 Types des lubrifiants

La classification internationale adaptée pour les huiles pour moteurs et les huiles pour transmissions (engrenages d'automobiles) est celle de la SAE américaine (Society of Automotive Engineers), basée sur la viscosité. [7]

On peut distinguer deux types d'huiles lubrifiantes :

I.4.1 Les huiles monogrades

Ce type d'huile lubrifiante est identifié par un seul grade de viscosité. La norme SAE a établi une classification comprenant deux catégories de grades :

- La première pour les huiles dites d'hiver, notée par la lettre W (de winter en anglais). A titre d'exemple l'huile moteur SAE 25W, 15W, 20W.
- La seconde pour les huiles dites d'été, indiquées par les chiffres SAE 20, 30, 40.

I.4.2 Les huiles multigrades

Les huiles multigrades sont des huiles particulières qui répondent à la fois à un grade SAE dit d'hiver et à un grade SAE dit d'été. C'est-à-dire utilisées toute l'année en été comme en hiver. Exemple SAE 45W40, Le premier grade 45W indique la viscosité à froid, le second 40 désigne la viscosité à chaud. [5]

Ces huiles possèdent à la fois les limites de viscosité d'un grade à froid et d'un grade à chaud et se distinguent par un point de congélation très bas et un indice de viscosité très haut.

I.5 Propriétés physiques des huiles de lubrification

Les principales propriétés physiques des huiles lubrifiant sont :

I.5.1 Densité

La densité d'une huile, souvent donnée dans les documents techniques, est le rapport de la masse d'un certain volume de cette huile à une température donnée (généralement 15 ou 20° C) à celle du même volume d'eau à 4° C. Elle est désignée par d_4^{15} ou d_4^{20} et est sans dimension. La densité diminue avec la température selon des lois complexes, la majorité des l'huiles lubrifiantes synthétiques possèdent des densités beaucoup plus élevées, jusqu'à 1,5.

I.5.2 Point d'éclair

Cette caractéristique permet de connaître jusqu'à qu'elle température une huile pourra être chauffé sans danger, parce que les constituants volatils des huiles peuvent bruler au contact d'une flamme. Il est mesuré en chauffant progressivement le mélange huile-vapeur-air dans un récipient de laboratoire standard jusqu'à ce que le mélange s'enflamme. Donc on utilise une expérience qui consiste à chauffer un échantillon d'un produit pétrolier dans un creuset ouvert ou fermé à vitesse déterminée jusqu'à ce qu'une quantité suffisante d'éléments volatils passent en phase vapeur et puissent pouvoir être enflammée par une petite flamme placée au bord du creuset.

I.5.3 Couleur :

Pour les huiles minérales, généralement ses couleurs varient du blanc pur au rouge foncé en passant par le jaune citron et le jaune orange. Avec plusieurs des processus de raffinage la couleur des huiles de base va être bien claire. La présence d'additifs assombrés pratiquement toujours les huiles de base. Au cours de leur utilisation, les huiles s'altèrent et deviennent de plus en plus foncées. C'est le cas des huiles dans les moteurs thermique.

I.5.4 Capacité thermique massique

Cette propriété physique est importante pour quantifier le rôle caloporteur de l'huile lubrifiant. La capacité thermique d'un fluide correspond à l'énergie qu'il faut lui apporter pour augmenter sa température d'un degré. La capacité thermique, exprimée en joule par kelvin (J/K) et désignée par la lettre « C » en majuscule, traduit l'aptitude d'un matériau à absorber une quantité de chaleur (Q) et à s'échauffer (élévation de sa température) de ΔT . La capacité thermique augmente avec la température, d'environ 20 % pour 100 °C, et diminue avec la densité.

I.5.5 Conductivité thermique

La conductivité thermique indique le flux thermique s'écoulant, en régime permanent, sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes d'un fluide. Elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmentent. La valeur moyenne de la conductivité thermique des huiles minérales est de 0,14 W/m.K.

I.5.6 Onctuosité

L'utilisation de cette propriété est très importante pour déterminer l'aptitude d'une huile à adhérer aux surfaces sous forme d'une couche moléculaire. Cette caractéristique est un ensemble de phénomènes liés à la capillarité, la tension superficielle et à des propriétés de contact avec la matière à l'échelle moléculaires.

I.6 Propriétés rhéologiques des huiles de lubrification

Dans les propriétés rhéologiques se trouvent la viscosité et le point d'écoulement du lubrifiant, sa pompabilité et sa filtrabilité. Nous verrons que toutes ces propriétés sont de première importance dans le cas de la lubrification des transmissions, surtout si l'amplitude des variations de température est importante.

I.6.1 Viscosité

De toutes les propriétés des huiles, la viscosité est certainement la plus importante. Elle détermine en effet l'essentiel des pertes par frottement et l'épaisseur

des films d'huile. La viscosité caractérise la résistance d'un fluide à l'écoulement, est une grandeur dépendante de la température. A basse température la viscosité est trop élevée, ainsi les frottements entre les surfaces des pièces mobiles sont importants. Plus l'huile est chaude, plus la viscosité est assez basse pour réduire les frottements internes. Ils existent deux types de viscosité : la viscosité dynamique et la viscosité cinématique.

La viscosité sera traitée avec détaille dans le 2^{ème} chapitre de ce mémoire.

I.6.2 Point d'écoulement

Le point d'écoulement se réfère à la température la plus basse à laquelle un lubrifiant continue de s'écouler. En dessous de ce point, l'huile tend à s'épaissir et à cesser de s'écouler librement. Dans cette caractéristique la relation entre la viscosité et la température est importante, parce que si la température est très basse les huiles lubrifiantes sont pâteuses en conséquence de l'accrochement des cristaux paraffines entre eux, c'est-à-dire l'écoulement des huiles va être très faible donc l'écoulement n'est plus possible. Pour améliorer l'écoulement des l'huiles lubrifiantes dans les basses températures comme dans cette caractéristique on doit ajouter des additifs.

I.6.3 Pompabilité

La lubrification des moteurs a besoin d'une caractéristique appelée la pompabilité, cette dernière permet de savoir à quel température le lubrifiant sera pompable et transportable dans les appareils que nous voulons lubrifier. Cette caractéristique est très importante notamment lors d'un démarrage à froid d'un moteur, car le lubrifiant est alors encore très visqueux. Généralement, selon la norme SAE, la température limite de pompabilité du lubrifiant moteur est fixée à 5° C en dessous de la température limite de démarrage. [8]

I.6.4 Filtrabilité

La filtrabilité des huiles lubrifiantes est un processus de liquidation de quelques déchets polluants. L'écoulement d'huile aux basses températures dans un circuit de lubrification provoque un colmatage temporaire à cause de la présence des cristaux paraffines. Un lubrifiant doit avoir l'aptitude d'être filtré sans provoquer le colmatage des filtres. Ce colmatage indésirable est aggravé par la présence des petites quantités d'eau ou des polluants solides, et il dure tant que la température du filtre et du lubrifiant n'augmente pas. [8]

I.7 Conclusion

Cette généralité sur les huiles lubrifiantes est loin d'être exhaustive. Néanmoins, elle a permis de présenter les connaissances de base d'une huile lubrifiante. L'huile de lubrification subit plusieurs transformations physico-chimiques dues aux divers phénomènes qui s'y reproduisent. Ces transformations qui font perdre à l'huile les qualités qui lui permettent d'assurer la fonction requise, parmi ces qualités : la viscosité, ce qui entraînent sa dégradation.

CHAPITRE II
NOTION DE BASE DE
LA VISCOSITE

II.1 Introduction

Dans le domaine de la lubrification, les propriétés physiques et chimiques du lubrifiant ont une grande importance, mais la viscosité est la plus importantes que les autres caractéristiques, cette dernière joue le rôle essentiel dans la détermination des pertes par frottement, la capacité de charge et l'épaisseur du film lubrifiant (film d'huile).

La viscosité est vraiment une mesure de la capacité physique d'un fluide à fournir une lubrification à film complet dans des conditions définies de vitesse, de charge et de température [8].

Dans ce chapitre, on présente les notions de base de la viscosité, sa relation avec des paramètres tels que la température et la pression, ainsi que les techniques de mesure de la viscosité.

II.2 Concept de la viscosité

La viscosité est la propriété essentielle de tous les lubrifiants, par définition on peut dire que la viscosité d'un fluide est la résistance opposée par ce fluide à tout glissement interne de ses molécules les unes sur les autres. Pour mieux comprendre nous prenons un exemple de l'eau et du miel, L'eau s'écoule relativement facilement, tandis que le miel est beaucoup moins fluide. Comme ce dernier est beaucoup plus résistant à l'écoulement, on peut dire qu'il a une plus grande viscosité que l'eau. Dans le passé, la viscosité était appelée le coefficient de frottement interne. [9]

Le concept de la viscosité est illustré par la Fig II.1, ou une plaque se déplace à vitesse uniforme sur un film lubrifiant :

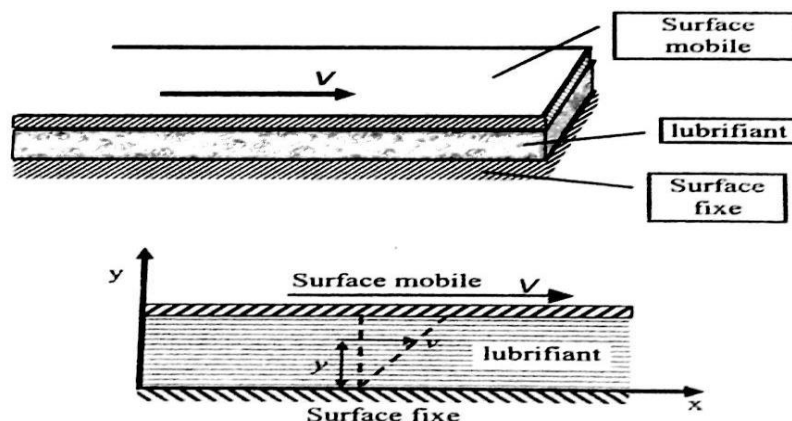


Figure II.1 : Le concept de la viscosité.

II.2.1 La contrainte de cisaillement

A partir de la (Fig II.1) ci-dessus, considérons deux plaques, qui sont séparées par un fluide, la distance entre les deux plaques est caractérisée par (h) qui est l'épaisseur du fluide. On suppose qu'une plaque fixe et l'autre mobile avec une certaine vitesse (V) à cause d'une force (F) exercée sur la surface A de la plaque mobile. La contrainte de cisaillement est définie comme le rapport de la force F sur la surface A.

$$\tau = F/A \quad (\text{II.1})$$

II.2.2 La déformation de cisaillement

A cause de la contrainte de cisaillement, une déformation s'effectue alors par un glissement relatif des différentes couches les unes par rapport aux autres. On définit La déformation de cisaillement subi par le matériau comme suit :

$$\gamma = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (\text{II.2})$$

II.2.3 Le taux de cisaillement

Le taux de cisaillement est défini par la vitesse de déformation :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{\frac{dx}{dt}}{\Delta y} = \frac{V}{h} \quad (\text{II.3})$$

II.2.4 La viscosité dynamique

La viscosité dynamique est utilisée pour les produits plus lourds, elle permet de calcul l'épaisseur de film d'huile et la portance hydrodynamique. La viscosité déduite par la loi de Newton régissant l'écoulement laminaire d'un fluide visqueux entre la surface S mobile animée d'une vitesse V et une surface fixe. Ces deux surfaces séparées par une distance h égale à l'épaisseur du film d'huile. Le déplacement relatif des deux surfaces nécessite un effort F destiné à vaincre la résistance tangentielle au frottement visqueux du fluide. Pour les liquides Newtoniens tels que les huiles de base minérale, le rapport F/A est proportionnel au rapport du $\dot{\gamma}/h$, le facteur de proportionnalité η étant le coefficient de viscosité dynamique ou simplement la viscosité dynamique. [10]

$$F/A = \eta \dot{\gamma}/h$$

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

II.2.5 La viscosité cinématique

La viscosité cinématique est définie comme le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique.

$$\nu = \eta / \rho \quad (\text{II.5})$$

Les unités dans le système international (SI) des différents paramètres sont mentionnées dans le tableau II.1.

Tableau II.1: les unités de la viscosité et le taux de cisaillement.

	Système internationale (SI)
Le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$	s^{-1}
La viscosité dynamique η	Pa.s
La viscosité cinématique ν	$m^2 \cdot s^{-1}$

II.3 Relation viscosité-température

Généralement, la viscosité des fluides dépend fortement de la température. Cette variation qui au voisinage de 20° C est de 2,5% par degré pour l'eau, peut atteindre jusqu'à 10 à 15% par degré pour les huiles minérales. La viscosité a une variation exponentielle décroissante avec la température, c'est-à-dire elle chute rapidement aux basses températures et plus lentement aux températures élevées (Fig.II.2).

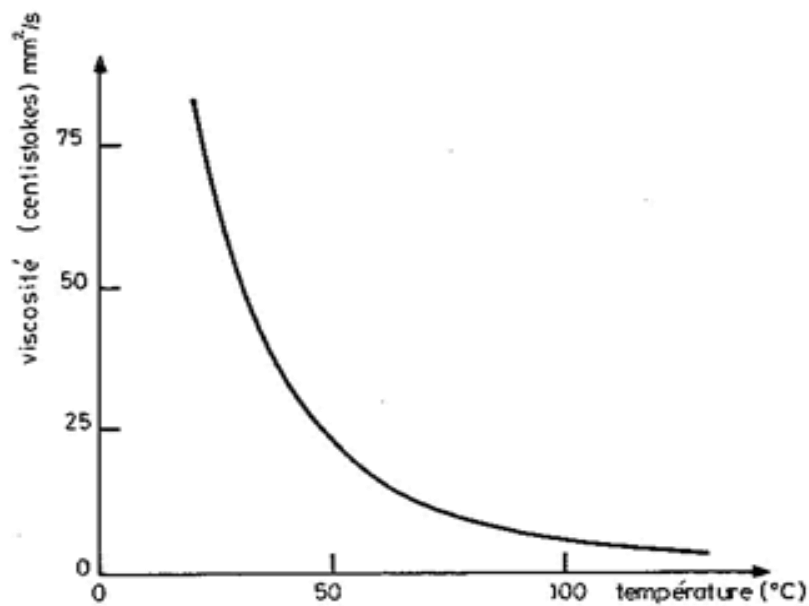


Figure II.2 : Evolution de la viscosité d'une huile en fonction de la température. [8]

Il existe dans la littérature plusieurs approximations analytiques pour la variation de la viscosité avec la température. Les équations les plus couramment utilisées sont données dans le tableau II.2 :

Tableau II.2 : Equations viscosité-température.

L'équation de Slotte	$\eta = \frac{a}{(T-T_c)^m}$
La relation de Reynolds	$\eta = \eta_0 e^{-\beta (T-T_0)}$
L'équation de McCoull et Walther	$\log_{10} [\log_{10} (v_{cSt} + C_1)] = C_2 - C_3 \log_{10} T^{\circ}K$
L'équation de Roelands	$\text{Log}_{10} [\log_{10} \mu_{cp} + 1,200] = \log_{10} G_0 - S_0 \log_{10} \left(1 + \frac{T^{\circ}c}{135}\right)$
L'équation de Vogel	$\eta(T) = a \exp [b/(T-c)]$

II.4 Index (ou indice) de viscosité

L'indice de viscosité est un système de comparaison entre les huiles lubrifiantes de différentes viscosités avec la variation de température, ce dernier a été développé par Deam et Davis (1929). Ces auteurs ont classé toutes les huiles connues en différentes catégories selon la valeur de leur viscosité cinématique à 210° F (98° C). Parmi toutes les huiles de même viscosité à 210 F, ils ont retenu les deux huiles ayant à 100° F (37,8° C) d'une part, la plus faible viscosité et d'autre part, la plus grande viscosité. La première correspond à une huile à caractère paraffinique, dont la viscosité varie relativement peu avec la température. La seconde à une huile à caractère naphénique, dont la viscosité varie beaucoup avec la température. Ils ont alors donné arbitrairement l'indice 100 à la première et 0 à la seconde. En Europe et depuis 1975 aux Etats Unis, les températures de références sont de 40° et 100° C.

Pour déterminer l'indice de viscosité d'une huile de viscosité U à 40° C et P à 100° C, on recherche les viscosités respectives L et H à 40° C des huiles de références à caractères paraffinique et naphthénique ayant la viscosité P à 100° C (Fig. II.3). L'indice de viscosité VI (Viscosity Index) est alors donné par :

$$VI = 100 \frac{(L-U)}{(L-H)} \quad (II.6)$$

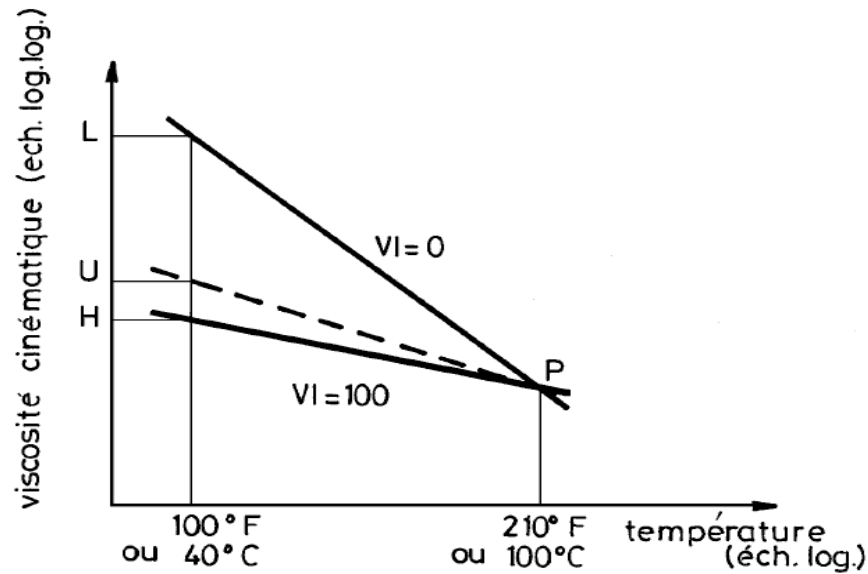


Figure II.3: diagramme de l'indice de viscosité. [11]

II.5 Relation viscosité-pression

La majorité des huiles lubrifiantes possède une viscosité qui augmente beaucoup avec la pression. Ce phénomène présente une importance pratique car dans certains mécanismes le lubrifiant subit des pressions qui peuvent atteindre 10^9 Pa, c'est le cas en particulier dans les roulements et les engrenages. [12]

Notons encore que les fluides de faible viscosité sont moins affectés par une augmentation de pression que les fluides de grande viscosité. Pour représenter la variation de la viscosité avec la pression on utilise la relation empirique suivante due à Barus :

$$v_P = v_0 e^{\alpha p} \quad (II.7)$$

Avec :

v_P est la viscosité cinématique à la pression p ,

ν_0 est la viscosité cinématique à pression atmosphérique,

p est la pression de contact,

α est le coefficient viscosité-pression.

Ce coefficient est généralement compris entre :

$$5 \cdot 10^{-9} < \alpha < 40 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$$

II.6 Relation viscosité-taux de cisaillement

La plupart des huiles minérales et synthétiques sont des huiles newtoniennes, qui ne comportent pas d'additif à améliorant l'indice de viscosité, ces huiles leur viscosité ne varie pas lorsqu'elles sont soumises à un cisaillement dans les organes mécaniques rapides et avec des faibles jeux de fonctionnement. Par contre les huiles qui ne contiennent pas les additifs d'amélioration de l'indice de viscosité sont sensibles au cisaillement mécanique.

Les essais expérimentaux ont montré que la viscosité du fluide diminue lorsque le taux de cisaillement augmente, généralement cet influence est réversible pour les huiles qui contiennent des additifs améliorant l'indice de viscosité. Ce comportement est dit non newtonien. La figure II.4 représente la variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement d'un fluide newtonien et d'un autre non newtonien.

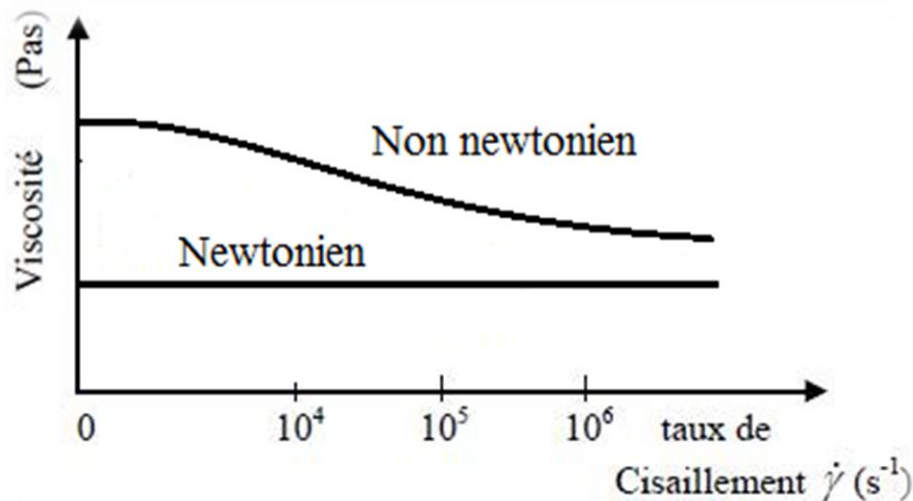


Figure II.4 : Variation de la viscosité avec le taux de cisaillement. [11]

II.7 Types de fluide en fonction de la viscosité

Les fluides les plus importants en lubrification se décomposent en deux grandes familles :

II.7.1 Fluides newtoniens

Sont des fluides visqueux idéaux qui lorsque ils sont soumis à une contrainte de cisaillement, leur viscosité est constante. A titre d'exemple : l'eau, l'essence, l'air, la plupart des gaz ainsi que les huiles minérales sont des fluides newtoniens. Ces fluides peuvent être décrits par la seule connaissance de leur viscosité et de leur densité. Pour un fluide newtonien la vitesse de déformation est proportionnelle à la contrainte de cisaillement appliquée et la constante de proportionnalité est appelée viscosité (Eq. II.4). Ces fluides présentent une relation linéaire entre contrainte et déformation. [13]

Le comportement d'un fluide Newtonien est représenté graphiquement dans la figure II.5 ci-dessous :

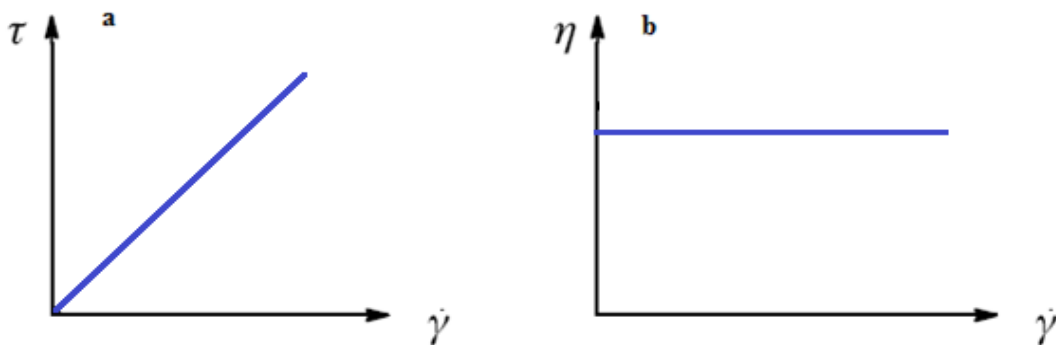


Figure II.5: Rhéogramme d'un fluide newtonien.

La figure II.5.(a) montre que La contrainte de cisaillement est une fonction linéaire croissante en fonction de la vitesse de cisaillement représenté par une droite passant par l'origine. Tandis que la courbe (b) illustre la variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement qui reste constante quel que soit la valeur du taux de cisaillement.

II.7.2 Fluides non Newtoniens

En réalité, les fluides qui possèdent des comportements non newtonien sont utilisés actuellement dans de nombreuses activités industrielles tels que les domaines pétrolières, chimique, biochimique, agroalimentaire. Les fluides non newtoniens ont un comportement qui est caractérisé par une proportionnalité non linéaire entre la contrainte de cisaillement τ (Pa) et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ (s^{-1}). Le coefficient de proportionnalité qui les relie est appelé viscosité dynamique apparente η (Pa.s). La viscosité n'est plus constante à température et pression donnée mais dépend de la vitesse de cisaillement. La figure II.6 illustre la variation de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement.

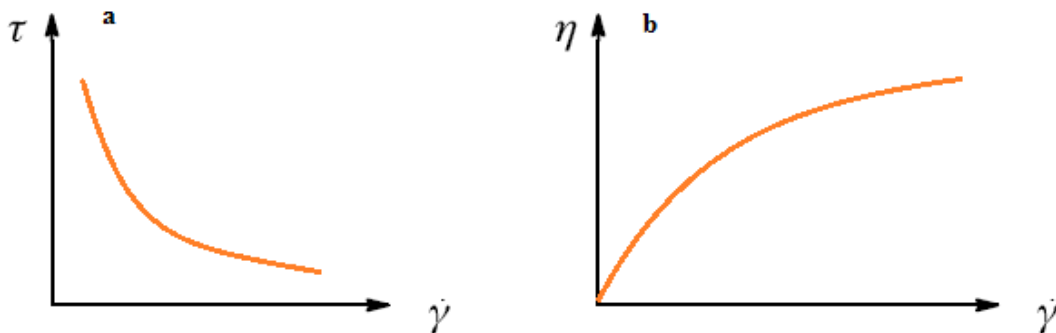


Figure II.6 : Rhéogramme d'un fluide non newtonien.

Dans la famille des fluides non newtoniens, les comportements les plus courants de ces fluides peuvent être classés en trois grandes catégories, qui sont les fluides à seuil, les fluides rhéo-épaississant et les fluides rhéofluidifiants.

II.7.2.1 fluides rhéofluidifiants

Les fluides rhéofluidifiants sont des fluides qui deviennent moins visqueux lorsqu'on leur applique une contrainte de cisaillement. Dans ce cas la viscosité de ces fluides diminue lorsque le taux de cisaillement augmente (Fig II.7 (a)). De nombreux fluides montrent ce comportement : sang, shampoing, peintures ou encore solutions de polymère. [14]

Ostwald en 1925, propose une loi empirique utilisée pour la variation de la viscosité avec le gradient de vitesse, cette loi est appelée la loi de puissance :

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

II.7.2.2 Fluides rhéo-épaississants

C'est le comportement inverse du cas rhéofluidifiants : la viscosité du fluide augmente avec le taux de cisaillement (Fig II.7 (c)), c'est-à-dire les fluides rhéo-épaississants deviennent plus visqueux lorsqu'on les soumet à une contrainte de cisaillement. Le rhéo-épaississement est beaucoup plus rarement observé que la rhéofluidification. L'exemple le plus connu est la Maïzena. Si l'on souhaite introduire une cuillère dans un verre de Maïzena, il vaut mieux y aller doucement, car dans ce cas la viscosité du fluide sera plus petite car peu cisailée. [15]

II.7.2.3 Fluides à contrainte seuil

Ce type des fluides sont aussi appelés fluides de Bingham, sont caractérisés par une contrainte non-nulle à taux de cisaillement faible. Comme exemple des fluides à seuil, on trouve : les peintures, les colles, les yaourts et la pâte d' dentifrice. Ils ne s'écoulent que lorsque la contrainte de cisaillement appliquée dépasse une valeur critique nommée contrainte seuil (Fig II.7 (d)). En dessous de cette valeur, la viscosité est infinie quelle que soit la contrainte appliquée. Pour faire sortir le dentifrice, il faut appuyer suffisamment sur le tube, sinon la contrainte est trop faible et celui-ci ne s'écoule pas. Pour décrire le comportement rhéologique d'un fluide à seuil. La représentation la plus simple est le modèle de Bingham (1922) qui donne la relation suivante entre contrainte et taux de cisaillement :

$$\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n \quad (\text{II. 9})$$

où τ_c est la contrainte seuil.

La figure II.7 représente la variation de la viscosité de tous les comportements d'un fluide non Newtonien en fonction du taux de cisaillement. [15]

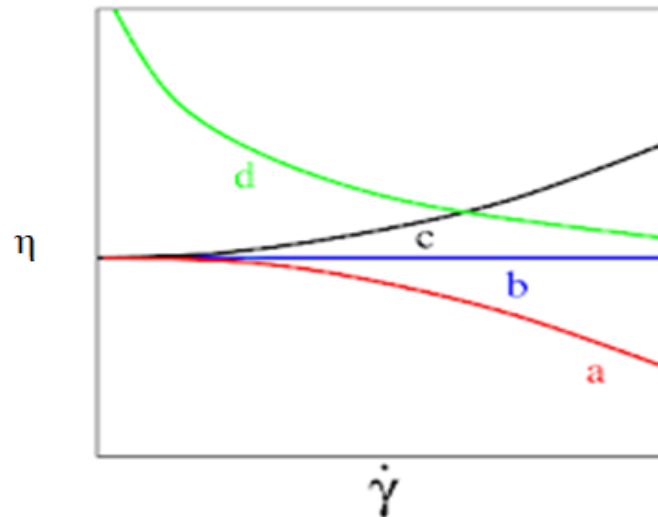


Figure II.7 : (a) Fluide rhéofluidifiant. (b) Fluide Newtonien. (c) Fluide rhéo-épaississant. (d) Fluide à contrainte seuil.

II.8 Techniques de mesure de la viscosité

Parmi les techniques de mesure de la viscosité d'un fluide, on utilise des viscosimètres qui se divisent en trois catégories, les viscosimètres à capillaires, les viscosimètres à rotations et les viscosimètres à chute de bille.

II.8.1 Les viscosimètres à capillaire

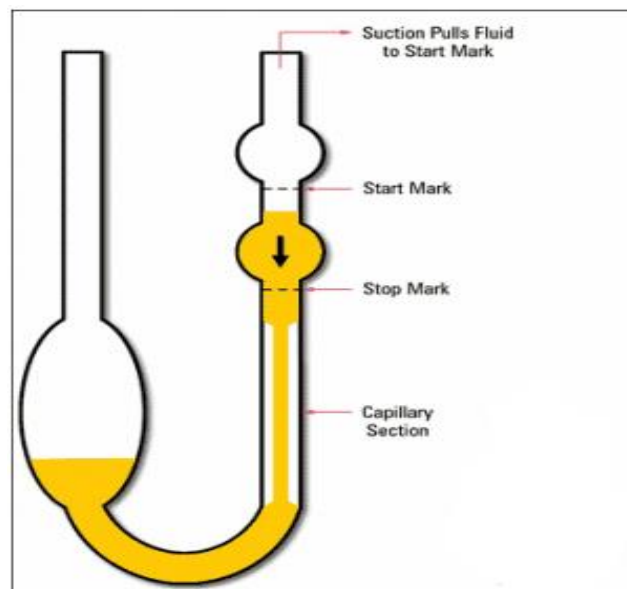


Figure II.8: schéma générale d'un viscosimètre à tube capillaire.

Il permet déterminer la viscosité dynamique absolu avec une grande précision, sa constitution repose sur l'expérience du physicien poiseuille, qui à montré que l'écoulement d'un liquide sous faible vitesse, dans un tube parfaitement lisse, se fait par couches concentriques et que la quantité de liquide traversant le tube peut se calculer par la formule suivante :

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\eta \ell} \quad (\text{II. 10})$$

Avec :

ℓ : longueur du tube;

r : rayon du tube;

η : viscosité dynamique;

Q : débit volumique ;

Δp : est la chute de pression entre le début du capillaire (pression mesurée par le capteur) et la fin du capillaire (pression atmosphérique).

La viscosité cinématique peut être déduite à partir du temps « t » mis par un volume (V) de fluide à s'écouler au travers du tube capillaire par la relation.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\pi R^4 g t}{8M} = Kt \quad (\text{II. 11})$$

Avec :

ρ : la masse volumique du fluide,

g : l'accélération de la pesanteur

Cet appareil permet de mesurer des viscosités avec une précision supérieure à 0.3 %.

[16]

II.8.2 Viscosimètre à cylindres rotatifs

Le viscosimètre à cylindres rotatifs est un appareil le plus couramment utilisé pour mesurer la viscosité dynamique d'un fluide Newtonien, cet appareil a été construit par Tylor-Couette.

Le dessin ci-dessous schématise le viscosimètre de couette figure (II.9) :

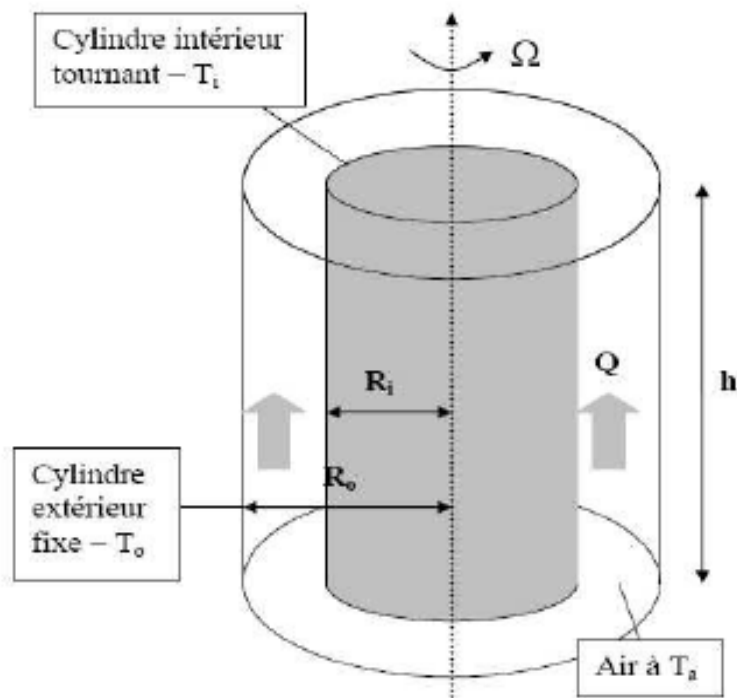


Figure II.9: schéma de viscosimètre de Couette.

Le liquide de viscosité η à étudier est placé entre deux cylindres coaxiaux verticaux, dont l'un l'externe est mis en rotation à une vitesse Ω et dont l'autre interne reste immobile, le fluide est rempli entre les deux cylindres et il subit une contrainte purement tangentielle. La mesure de la force ou du moment qu'il convient d'exercer pour maintenir l'un des deux cylindre en rotation permet d'accéder à la vitesse du fluide. [17]

On mesure le couple résistant transmis par le fluide contenu entre les deux cylindres Coaxiaux.

Si le cylindre intérieur est seul en rotation, et si $R_1 \approx R_2 \approx R$ et $C = R_2 - R_1$

Le couple devient :

$$T = \frac{2\pi\eta R L\omega}{C} \quad (\text{II. 12})$$

Avec :

R : rayon du cylindre extérieur;

L : longueur du cylindre intérieur,

ω : vitesse angulaire.

II.8.3 Viscosimètre à chute de bille

Le viscosimètre à chute de bille est une simple éprouvette remplie du fluide à étudier, dans lesquels chutent des billes sphériques en acier de masse (m) et rayon (R) connu. La figure II.10 représente un viscosimètre à chute de bille.

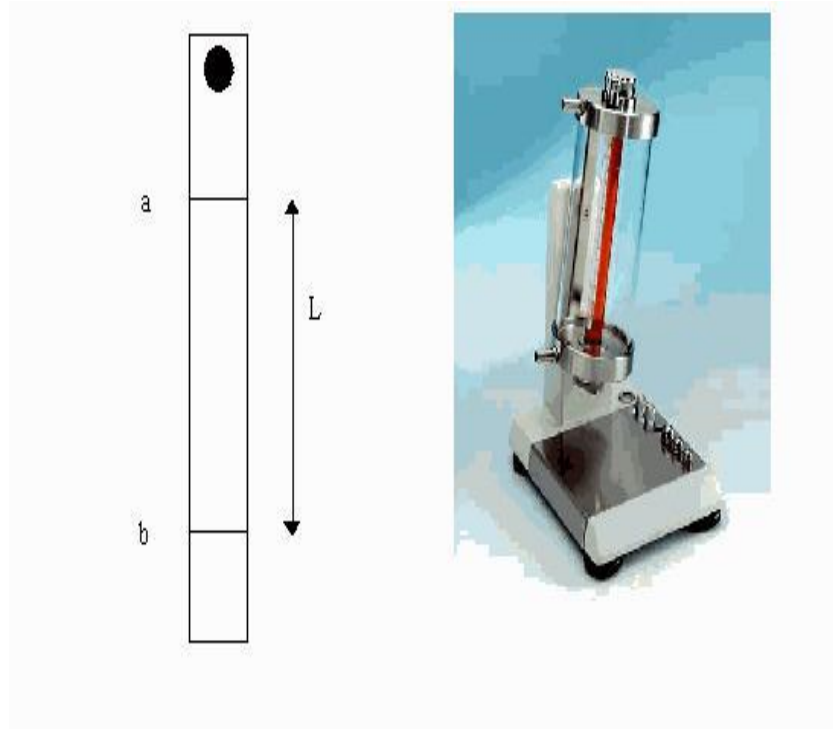


Figure II.10 : viscosimètre à chute de bille.

Le principe de ce dispositif est de faire tomber une bille en acier lentement dans un tube bien calibré renfermant le liquide visqueux (mouvement sans accélération de la bille). La durée (Δt) est mesurée à partir de la parcourir de la bille pour une certaine distance connue. On montre que la viscosité dynamique η est proportionnelle à la durée du trajet soit :

$$\eta = C \Delta t \quad (\text{II. 13})$$

C : est une constante qui dépend des propriétés de la bille.

Partie II

Etude numérique

CHAPITRE III

ETUDE

NUMERIQUE

III.1 Introduction

La viscosité des huiles lubrifiantes est extrêmement sensible à la température de fonctionnement. Du point de vue de l'ingénierie, il est important de connaître la valeur de la viscosité à une température de fonctionnement, car cela permet de déterminer l'épaisseur du film lubrifiant séparant les surfaces de contact. La viscosité de l'huile à une température particulière peut être soit calculée à partir de l'équation viscosité-température, soit obtenue à partir de l'abaque ASTM viscosité-température. Dans cette partie, on a développé un programme numérique codé en fortran qui permet de donner des solutions à l'équation de viscosité de Vogel :

$$\eta (T) = a.\exp [b/(T-C)]$$

Avec :

η : viscosité dynamique : [mPa.s]

T : température en [$^{\circ}$ C]

a,b,c : les coefficients de l'équation de Vogel

Le programme donne la possibilité de déterminer la viscosité à une température donnée, ou la température pour une viscosité donnée.

III.2 Organigramme

L'organigramme suivant (Fig.III.1) résume toutes les étapes nécessaires et successives pour la résolution de l'équation de Vogel : $\eta(T) = a.\exp [b/(T-C)]$

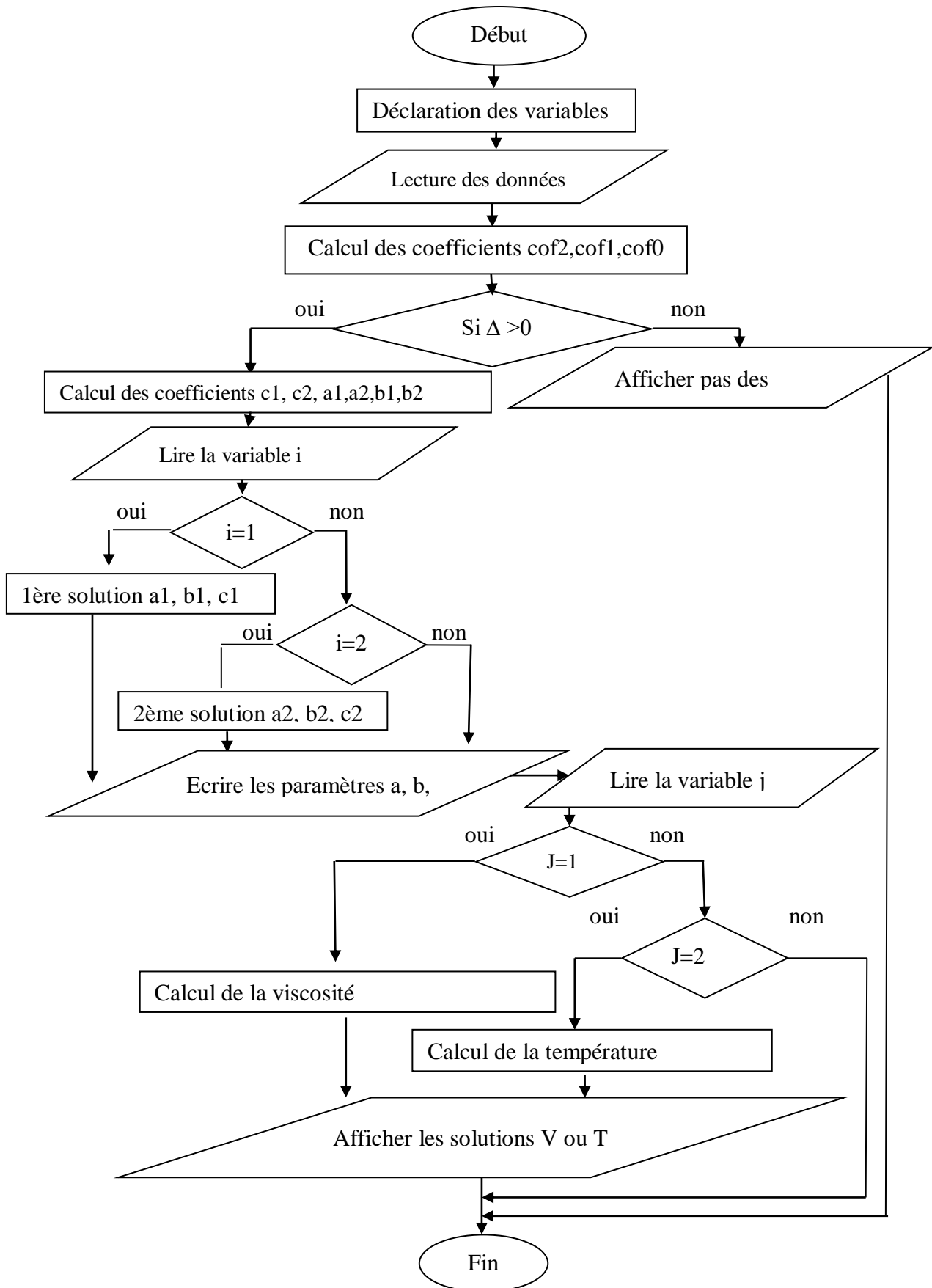


Figure III.1: organigramme de résolution de l'équation de Vogel.

III.3 Programme viscosité

```

program viscosite
implicit none
REAL temp(3)
REAL visc(3)
REAL a,b,c,a1,c1,b1,a2,b2,c2
REAL delta
REAL T,V
REAL coffc0,coffc1,coffc2
integer i, j
! initialisation
DATA temp/100,60,20/; temp=temp+273.15
DATA visc/0.0099,0.0351,0.387/
! calcul des coefficients de l'equation de Vogel
! Equation de Vogel V=aexp(b/(t-c))
coffc1=-(temp(1)+Temp(2))*(Temp(3)-Temp(1))*(LOG(visc(1))-
LOG(visc(2)))+(Temp(1)+Temp(3))*(Temp(2)-Temp(1))* &
      (LOG(visc(1))-LOG(visc(3)))
coffc2=(temp(3)-temp(1))*(LOG(visc(1))-LOG(visc(2)))-(temp(2)-temp(1))*(LOG(visc(1))-
LOG(visc(3)))
coffc0=Temp(1)*Temp(2)*(Temp(3)-Temp(1))*(LOG(visc(1))-LOG(visc(2)))-(temp(2)-
Temp(1))*(LOG(visc(1))-LOG(visc(3)))*Temp(1)*Temp(3)
delta=coffc1*coffc1-4*coffc2*coffc0
! Resolution de l'equation quadratique
IF(delta.LT.0) STOP 'solution negative, arret du programme'
c1=(-coffc1+SQRT(delta))/(2*coffc2)
c2=(-coffc1-SQRT(delta))/(2*coffc2)
b1=(LOG(visc(1))-LOG(visc(2)))*(Temp(1)-c1)*(Temp(2)-c1)/(Temp(2)-Temp(1))
b2=(LOG(visc(1))-LOG(visc(2)))*(Temp(1)-c2)*(Temp(2)-c2)/(Temp(2)-Temp(1))
a1=visc(1)*EXP(-b1/(temp(1)-c1))
a2=visc(1)*EXP(-b2/(temp(1)-c2))
! choix de la solution
PRINT*, 'choisir la solution 1 ou 2'
READ*, i

```

```
select case (i)
  CASE (1)
! 1ere solution
b1=b1-273.15
c1=c1-273.15
a=a1
b=b1
C=c1
CASE (2)
! 2eme solution
b2=b2-273.15
c2=c2-273.15
a=a2
b=b2
c=c2
end select
PRINT*, 'le parametre a=',a, '[mPas]'
PRINT*, 'le parametre b=',b, '[C]'
PRINT*, 'le parametre c=',c, '[C]'
! choix de la solution
PRINT*, 'choisir 10 pour calculer la viscosite et 20 pour calculer la temperature'
READ*, j
select case (j)
  case (10)
PRINT*, 'Calcul de la viscosite à une temperature donnee'
PRINT*, 'Entree la temperature en degre celsius'
READ*, T
T=T+273.15
V=a*EXP(b/(T-c))
PRINT*, 'a la temperature', T-273.15, 'la viscosite vaut', V, '[mPas]'
CASE (20)
PRINT*, 'Calcul de la temperature a une viscosité donnee'
PRINT*, 'Entree la viscosite en [mPas]'
READ*, V
T=(b/LOG(v/a))+c
```

```
PRINT*, 'a une viscosite ',V,'Correspond une temperature', T-273.15
END select
end PROGRAM
```

III.4 Description du programme

Le programme développé permet de donner des solutions à l'équation de viscosité de Vogel : $V(T) = a \cdot \exp [b/(T-C)]$, pour calculer la viscosité à n'importe quelle température, ou bien l'inverse c'est-à-dire de calculer la température à une viscosité donnée. On doit déterminer les constantes a, b et c. Pour cela, on fait la substitution de 3 températures et 3 viscosités correspondantes dans 3 équations.

$$\ln(V_1) = \ln(a) + (b/(T_1 - c)) \dots \dots \dots (1)$$

$$\ln(V_2) = \ln(a) + (b/(T_2 - c)) \dots \dots \dots (2)$$

$$\ln(V_3) = \ln(a) + (b/(T_3 - c)) \dots \dots \dots (3)$$

La combinaison de ces 3 équations permet d'éliminer a et b, il reste uniquement la constante c. on détermine une équation quadratique sous la forme :

$$cof_2 * c^2 + cof_1 * c + cof_0 = 0$$

Ensuite, nous résolvons cette équation, si le déterminant est positif, deux valeurs de (c): c_1 et c_2 , sont déterminés, ensuite les valeurs correspondantes (a) et (b) sont calculés a_1, a_2, b_1, b_2 .

Donc sont trouvés deux solutions :

1^{er} solution : $c = c_1, a = a_1, b = b_1$

2^{ème} solution : $c = c_2, a = a_2, b = b_2$

Nous choisissons la première solution car la deuxième solution Cela pourrait nous donner l'état n'est pas définie, Le reste du programme est consacré à la détermination des valeurs de viscosité en fonction de la température, ou vice versa. Le programme est conçu d'une manière à ce qu'on peut répéter les calculs indéfiniment à chaque fois qu'on change les paramètres de calcul. Lorsque cette dernière étape du programme est exécutée, le programme est terminé.

III.5 Liste des variables

Temp : Vecteur de trois températures de l'équation de Vogel.

Visc : Vecteur de trois viscosités de l'équation de Vogel.

Case : Variable de contrôle pour choisir l'option du programme.

coffc0, coffc1, coffc2 : Coefficients de l'équation qui permet de déterminer les constantes de l'équation de Vogel.

Delta : Déterminant de l'équation quadratique.

a1, b1, c1: Coefficients de la 1ère solution de l'équation qui permet de déterminer les constantes de l'équation de Vogel.

a2, b2, c2: Coefficients de la 2ème solution de l'équation qui permet de déterminer les constantes de l'équation de Vogel.

a, b, c : les coefficients de l'équation de Vogel.

T : Température donnée ou à déterminer.

V : Viscosité dynamique donnée ou à déterminer.

η : Viscosité dynamique.

III.6 Exemple d'exécution :

Données d'entrée :

temp(1) = 100[°C], temp(2) = 60[°C], temp(3)=20[°C].

VISC(1) = 0.0099 [mPas], VISC(1) = 0.0351 [mPas], VISC(1) =0.387 [mPas].

Données de sortie :

1ère solution: a1 = 1.657979 [mPas], b1= 418.980100 [°C], c1= -69.244810 [°C]

2ème solution : a2 = 3.51000 [mPas], b2= -273.150000 [°C], c2= 100.000000 [°C]

```

choisir la solution 1 ou 2
1
le parametre a= 1.657979E-04[mPas]
le parametre b= 418.980100[°C]
le parametre c= -69.244810[°C]
choisir 10 pour calculer la viscosite et 20 pour calculer la temperature
10
Calcul de la viscosite α une temperature donnee
Entree la temperature en degre celsius
20
a la temperature 20.000000la viscosite vaut 5.268481E-04[mPas]
Press any key to continue

```

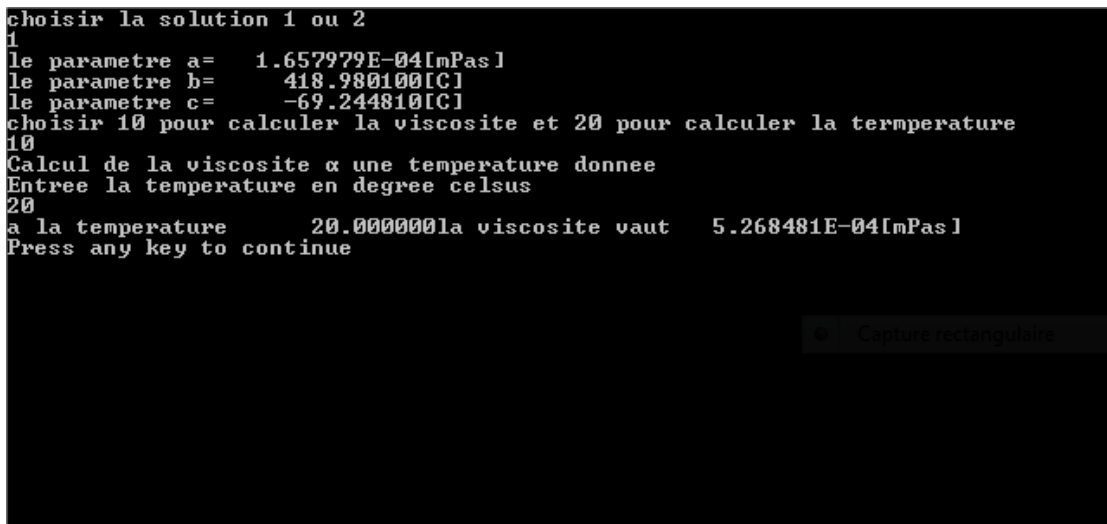


Figure III.2 : Interface d'affichage des résultats.

Partie III

Expérimentale

CHAPITRE IV

ETUDE

EXPERIMENTALE

IV.1 Introduction

Une série de mesures expérimentales a été réalisée sur un rhéomètre MCR 302 au sein du laboratoire de Fluides Industriels, Mesures et Application (FIMA) à l'université Djilali Bounaama de Khemis Miliana. L'objectif de ces essais expérimentaux est d'établir une relation entre la viscosité et le taux de cisaillement. L'effet de la température sur la viscosité a été étudié aux différents taux de cisaillement pour l'huile lubrifiante SAE 20W50. La viscosité apparente de huile a été mesurée expérimentalement dans un intervalle de température de - 15 à 15°C. Dans ce chapitre, on présente l'huile moteur multigrade utilisé, ainsi qu'une description du rhéomètre employé pour réaliser ces mesures. Le déroulement des essais est aussi présenté avec détail.

IV.2 Présentation de huile SAE 20W50

Une huile de marque CEPSA, fabriquée par CEPSA en Espagne. C'est une huile multigrade de type synthétique, à hautes prestation pour les motorisations tant américaines qu'européennes à essence et diesel. Son additivation exclusive offre une excellente protection et propreté du moteur tout au long de l'année, favorisant la conservation de celui-ci dans de parfaites condition d'utilisation. Elle est commercialisée sous le format bidon de 5 litre.

IV.3 Description du rhéomètre

Le rhéomètre est un appareil de laboratoire conçu pour faire des mesures relatives à la rhéologie d'un fluide. Il applique un cisaillement à l'échantillon. Généralement de faible dimension caractéristique, il permet d'étudier fondamentalement les propriétés d'écoulement d'un liquide, d'une suspension ou d'une pâte, en réponse à une force appliquée. Il permet de connaître les grandeurs fondamentales telles que le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$, la contrainte de cisaillement τ et la viscosité η . Le rhéomètre utilisé dans les essais expérimentaux est un rhéomètre compact modulaire Anton Paar MCR 302 (Fig. IV.1).



Figure IV.1: Rhéomètre Anton Paar MRC 302.

Un rhéomètre est constitué d'un axe de rotation lié à un moteur qui peut être soit à vitesse imposée, soit à un couple imposé et d'une cellule de mesure. La cellule est composée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Le fluide à étudier est confiné entre le rotor et le stator dans une zone appelés entrefer (Fig.IV.2).

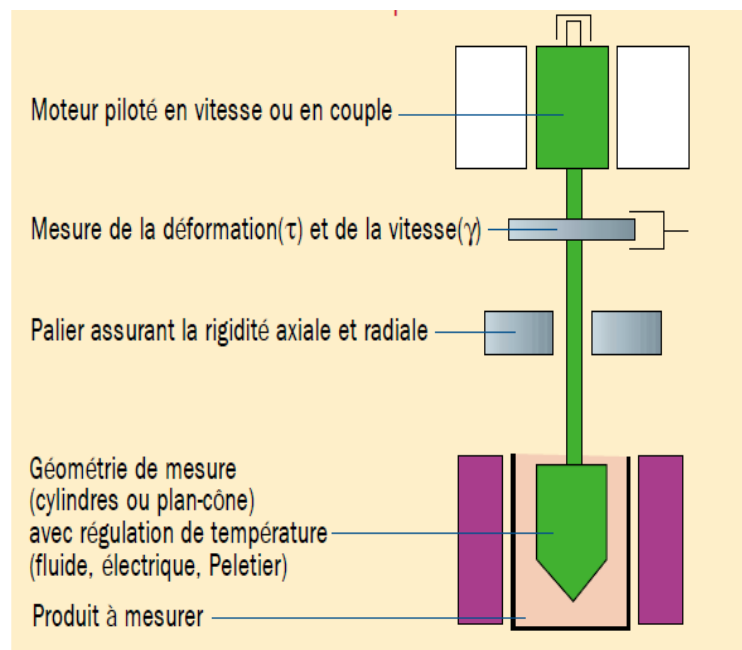


Figure IV.2 : principe de fonctionnement du rhéomètre.

Les spécifications techniques du rhéomètre MCR 302 sont :

- couple : 10 nN.m à 200 mN.m
- force normale : 0.005 à 50 N
- vitesse de rotation : 10^{-7} à 628 rad.s⁻¹
- fréquence d'oscillation : 10^{-7} à 628 rad.s⁻¹
- résolution angulaire : 10 nrad
- contrôle de la température : Module Peltier : -40 à 200 °C

Les écoulements sont bien définis, utilisant généralement des géométries de mesure différentes : plan-plan (Fig.IV.3.a), cône-plan (Fig.IV.3.b), cylindres coaxiaux ou cellule de couette (Fig.IV.3.c) et un système double entrefer (Fig.IV.3.d). Les trois grandeurs expérimentales qui entrent en jeu lors de la mesure sont le couple mécanique appliqué (mesuré), la vitesse angulaire Ω de rotation du rotor et l'angle de rotation du rotor mesuré à partir de la position au repos.

Le choix de la géométrie de mesure dépend du rapport entre la dimension moyenne de l'entrefer et le diamètre des plus grosses particules. En pratique l'entrefer doit être supérieur à, au moins, dix fois la taille des plus grosses particules en suspension. Toutefois, cette condition peut ne pas être suffisante et la nature du matériau à étudier doit être prise en compte.

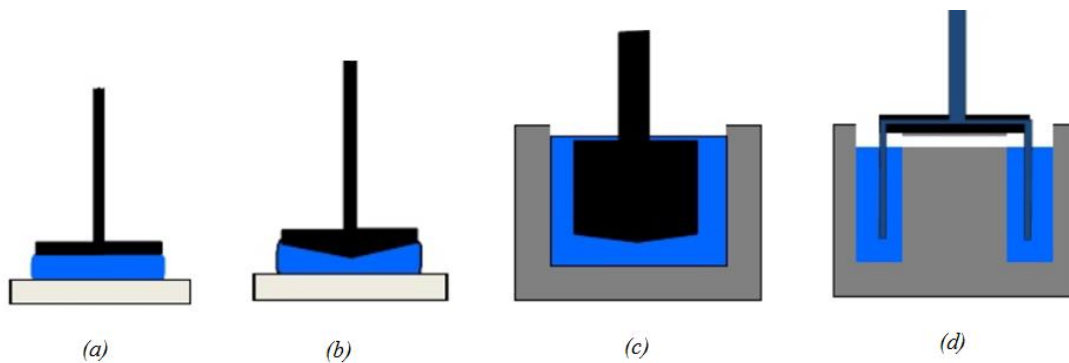


Figure IV.3 : Différentes géométries de mesure (a) plan-plan, (b) cône-plan, (c) cylindres coaxiaux, (d) double entrefer.

En raison de sa grande surface en contact avec le fluide, la cellule de Couette est la plus largement utilisée (Fig.IV.4), ce système est le plus convenable lorsque on travaille avec des échantillons à faible viscosité.

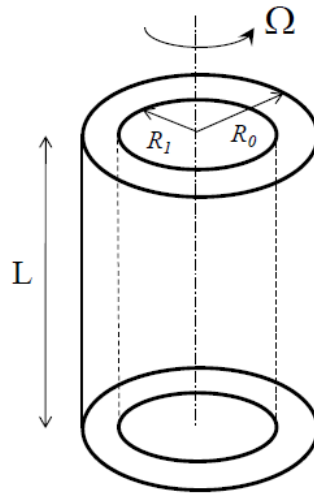


Figure IV.4 : Vue schématique d'un rhéomètre à cylindre concentrique.

La contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement ne sont pas constantes dans l'espace annulaire du dispositif. Cependant, dans le petit espace et vu la courbure des surfaces, la contrainte et le gradient de vitesse ne dépendra que des dimensions géométriques des cylindres. Dans ce cas :

$$\tau = \frac{M}{4\pi L} \frac{R_0^2 + R_1^2}{R_0^2 R_1^2} \quad (\text{IV.14})$$

où M est le couple appliqué, L la longueur du cylindre, R_0 et R_1 les rayons du cylindre extérieur et intérieur respectivement. Le taux de cisaillement est exprimé par:

$$\dot{\gamma} = \frac{R_1 \Omega}{e} \quad (\text{IV.14})$$

Avec Ω la vitesse angulaire macroscopique c'est à dire la vitesse imposée par le dispositif et $e = R_0 - R_1$, la largeur de l'espace annulaire contenant le fluide appelé souvent le gap.

Le fonctionnement du rhéomètre nécessite l'utilisation d'autres équipements, on cite notamment :

- Un compresseur d'air : indispensable pour le fonctionnement du moteur à palier à air, avec lequel est équipé le rhéomètre. Cette technologie (palier à air) permet une grande précision de mesure surtout pour les échantillons sensibles.
- Un bain à circulation : pour le contrôle de la température ou pour le refroidissement à contre-courant du dispositif de température, en particulier le système à effet Peltier.
- Un PC sur lequel est installé le logiciel du rhéomètre Rhéocompass.

IV.4 Déroulement des essais

IV.4.1 Démarrage et initialisation

Avant l'exécution d'une mesure, on doit suivre les étapes de démarrage recommandées par le constructeur à savoir :

- Mise en marche du compresseur pendant 5 minutes ou jusqu'à ce que le manomètre du compresseur indique une pression de 6 bars.
- Mise en marche du bain à circulation, en fixant une température de 22°C.
- Mise sous tension du rhéomètre à l'aide de l'interrupteur principal situé sur le côté gauche. Lorsque la procédure de démarrage est terminée et que le rhéomètre est prêt, l'expression "Status: O.K" s'affiche sur l'écran.
- Démarrage de l'ordinateur et son système d'exploitation, puis le lancement du logiciel du rhéomètre.

IV.4.2 Variation de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement

Dans cette manipulation, on mesure 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). Pendant l'initialisation, la tête de mesure se déplace vers la position supérieure pour vérifier le capteur d'entrefer. Le rotor exécute plusieurs rotations à grande vitesse pour vérifier le capteur de position. On monte le système de mesure (système à double entrefer). Configuration des paramètres de mesure : 30 points de mesure ont été sélectionnés et le taux de cisaillement varie de 1 à 30 s⁻¹. Toutes les mesures ont été effectuées à la température ambiante.

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. Cette manipulation est effectuée pour les deux types d'huiles multigrades.

IV.4.3 Variation de la viscosité apparente en fonction de la durée d'agitation

Dans cette manipulation, on mesure la viscosité apparente (η) de l'huile SAE 20W50 en fonction de la durée d'agitation en minute pour différents taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$). On suit la même procédure que lors de la première série de mesure. Après configuration des paramètres de mesure, 5 points de mesure ont été sélectionnés avec une durée d'agitation de 30 minutes. La température est maintenue constante à -5°C.

IV.4.4 Effet de la température sur la viscosité apparente

Dans cette manipulation, on mesure la viscosité apparente (η) en fonction de la température (T) pour différent taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$). Le type d'application choisit est une rotation en fonction de la température. Il faut noter que pour ces mesures, on réalise un test de pré cisaillement de -15°C jusqu'à 15°C ensuite un test de cisaillement réalisé de 15°C à -15°C, le test de pré cisaillement est nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique dans toute la cellule de mesure.

Après configuration des paramètres de mesure, 30 points de mesure ont été sélectionnés pendant le pré cisaillement avec une durée de 1 minute pour chaque point, et 76 points de mesure pour le cisaillement avec une durée de 24 secondes pour chaque point. Cette manipulation est effectuée pour les deux types d'huiles multigrades.

A la fin de chaque série de mesure, le système de mesure est déconnecté et on déplace la tête de l'instrument vers le haut, on retire l'échantillon et on nettoie le cylindre de mesure intérieur et extérieur.

Partie IV

Résultats et discussion

CHAPITRE V
RESULTATS
ET
DISCUSSIONS

V.1 Introduction

Les résultats numériques ainsi que les résultats obtenus lors des essais expérimentaux seront exposés et interprétés dans ce chapitre. Ces résultats porteront sur l'influence de la variation du taux de cisaillement sur la viscosité apparente, ainsi que l'influence de la température sur la viscosité d'huile moteur multigrade étudié.

V.2 Résultats numériques

L'exécution du programme en variant la température de 10 à 100°C avec un pas égal à 10°C permet de déterminer les résultats représentés dans le tableau V.1 et la figure V.1.

Tableau V.1 : Résultats numériques de la variation de la viscosité en fonction de température.

T (°C)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
η (mPas)	1.029	0.386	0.177	0.093	0.054	0.035	0.023	0.0171	0.0127	0.00989

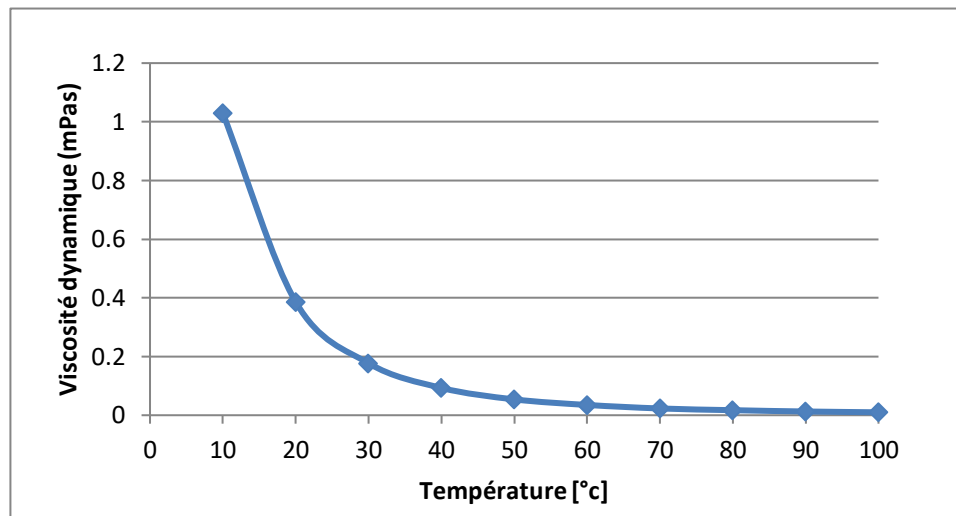


Figure V.1 : Variation de la viscosité en fonction de la température

D'après La figure V.1, on observe que la viscosité de l'huile lubrifiante diminue lorsque la température augmente.

V.3 Résultats expérimentaux

V.3.1 Variation de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement

La figure (V.2) et (V.3) représentent respectivement la courbe d'écoulement et le rhéogramme de l'huile multigrade SAE 20W50. Pour une température de -15°C , la viscosité apparente de cette huile diminue d'abord avec l'augmentation du taux de cisaillement, ensuite elle devient indépendante du taux de cisaillement. Pour les autres températures, la viscosité apparente est indépendante du taux de cisaillement. Par conséquent, cette huile multigrade se comporte comme un fluide pseudo plastique à une température de -15°C , et comme un fluide Newtonien pour des températures supérieures à -15°C .

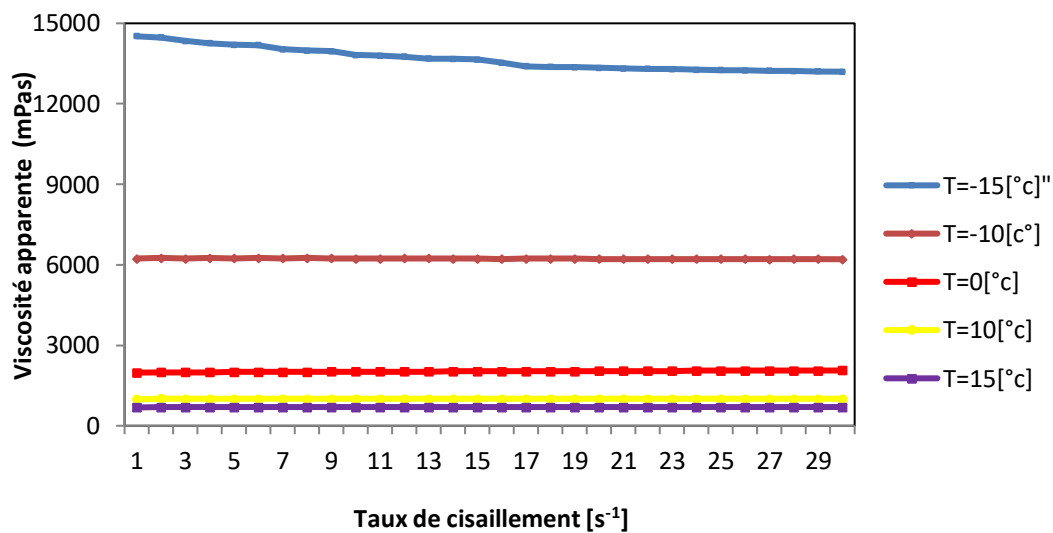


Figure V.2 : Variation de la viscosité apparente en fonctions du taux de cisaillement à différentes températures

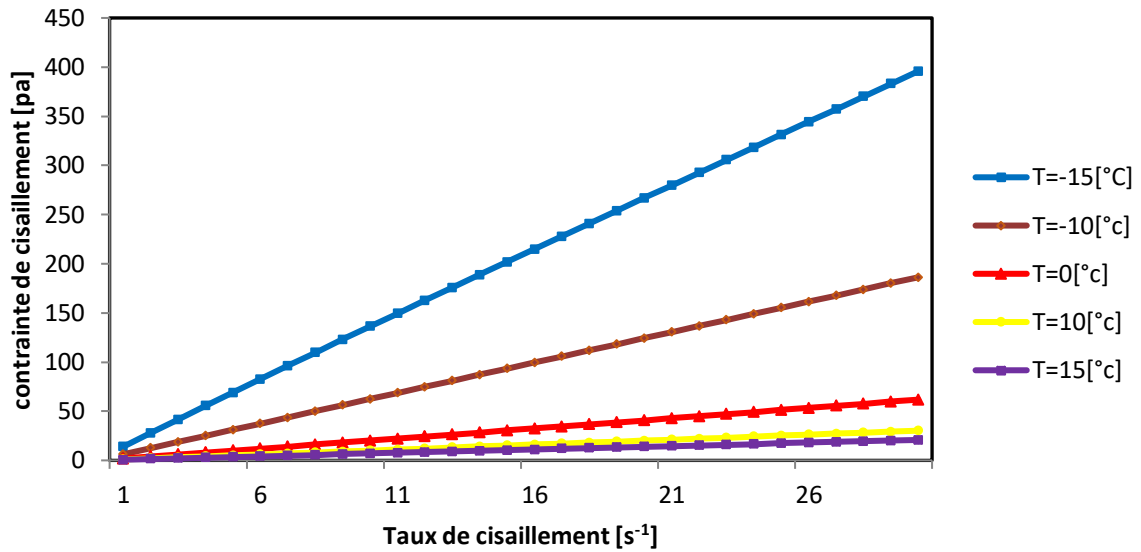


Figure V.3 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement à différentes températures.

V.3.2 Effet de la température sur la viscosité apparente

L'effet de la température sur la viscosité apparente pour huile multigrade SAE 20W50 à un taux de cisaillement de $75 s^{-1}$ est représenté dans la figure (V.4). D'une manière générale la viscosité apparente diminue avec l'augmentation de la température. L'huile SAE 20W50 a une variation de viscosité plus importante avec la température, ce dernier résultat est en accord avec l'indice de viscosité donné par les fabricants qui est de 123 pour l'huile SAE 20W50.

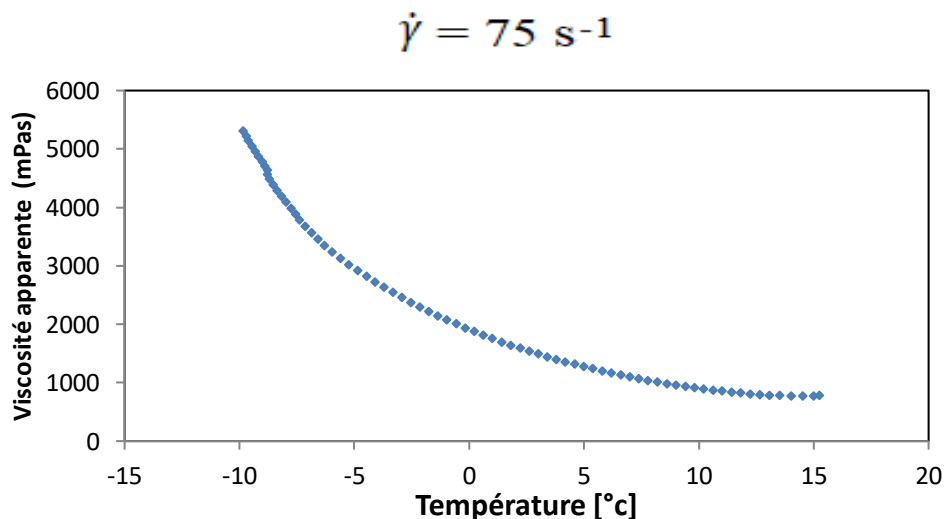


Figure V.4 : Variation de la viscosité apparente en fonction de la température à un taux de cisaillement $75 s^{-1}$

V.4 Comparaison résultats expérimentaux - modèle de Reynolds :

Les résultats expérimentaux de la variation de la viscosité avec la température ont été traités à l'aide de la méthode de l'analyse de régression, afin d'obtenir les valeurs des paramètres thermiques des huiles, correspondants aux modèles mathématiques reliant la viscosité à la température. On a comparés les résultats expérimentaux avec le modèle de Reynolds.

$$\eta = \eta_0 \exp(-\beta(T - T_0)) \quad (\text{V.15})$$

Pour déterminer le couple (η_0, T_0) et le coefficient de thermo viscosité β , on transforme l'équation (V.1) en prenant le logarithme de chaque membre :

$$\begin{aligned} \ln \eta &= \ln \eta_0 - \beta(T - T_0) \\ \ln \eta &= \ln \eta_0 + \beta T_0 - \beta T \\ \ln \eta &= (\ln \eta_0 + \beta T_0) - \beta T \end{aligned}$$

On trace la courbe de $(\ln \eta)$ en fonction de T , on obtient une droite de coefficient directeur $(-\beta)$ et d'ordonnée à l'origine $(\ln \eta_0 + \beta T_0)$, on trace la courbe de régression linéaire et on identifie les paramètres (η_0, T_0) et β , les résultats des paramètres de Reynolds sont présentés dans le tableau (V.1). Une fois ces paramètres identifiés, on trace la courbe de variation de la viscosité en fonction de la température selon le modèle de Reynolds et on compare cette courbe avec nos résultats expérimentaux.

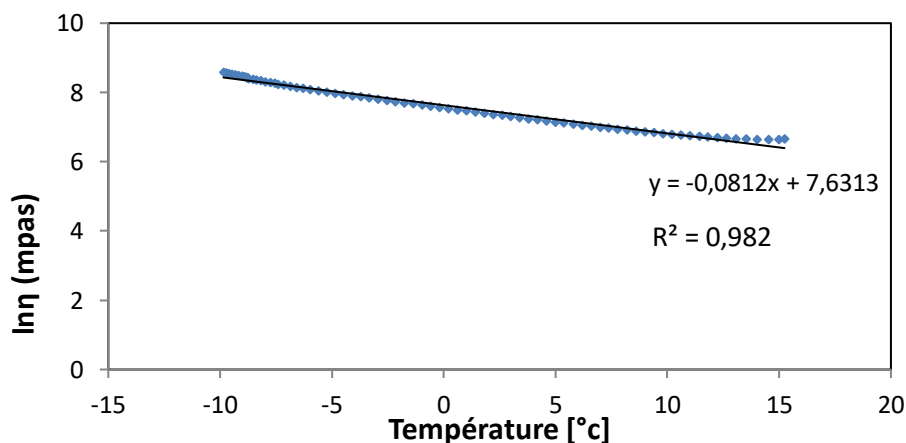


Figure V.5 : Régression linéaire des résultats expérimentaux pour l'huile SAE 20W50 à un taux de cisaillement de 75 s^{-1}

Lorsqu'on compare ces 2 équations :

$$\ln \eta = (\ln \eta_0 + \beta T_0) - \beta T$$

$$y = -0,0812x + 7,6313$$

$$\text{on aura : } \beta = 0,0812$$

$$\text{et } (\ln \eta_0 + \beta T_0) = 7,6313$$

Le couple qui vérifie cette dernière équation $(\eta_0, T_0) = (3782,9 ; -7,4)$

Tableau V.2 : Paramètres caractéristiques de la variation de la viscosité en fonction de la température du modèle de Reynolds

Paramètre	η_0 (mPa.s)	T_0 (°C)	β (°C ⁻¹)	Coefficient de corrélation
SAE 20w50	3782.9	-7.4	0.0812	0.982

Sur Les figures (V.6), on compare les résultats expérimentaux avec ceux obtenues à partir du modèle de Reynolds. On peut constater que le modèle de Reynolds est valable et peut représenter et prédire d'une manière plus au moins précise la variation de la viscosité en fonction de la température.

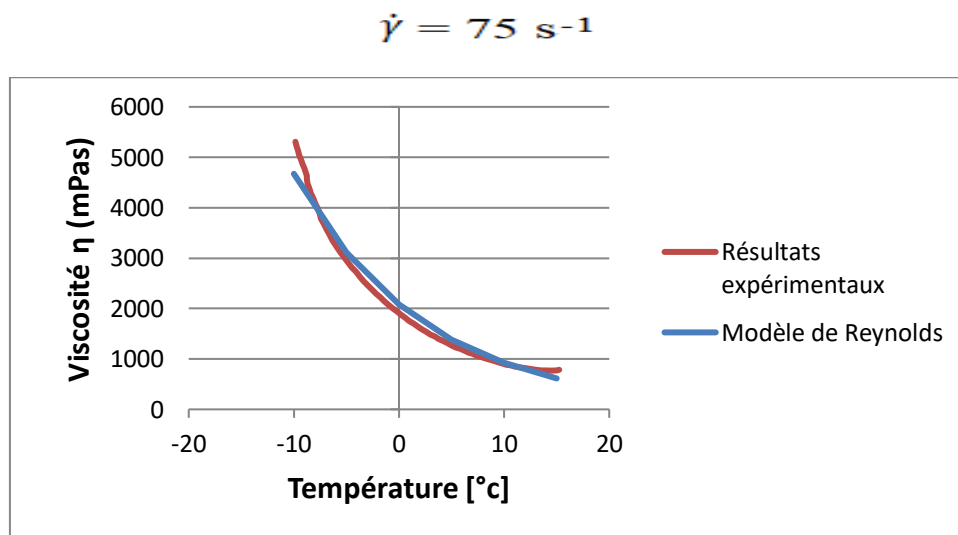


Figure V.6 : Comparaison des résultats expérimentaux avec ceux du modèle de Reynolds de l'huile SAE 20W50 à 75 s^{-1}

Conclusion générale

Les huiles lubrifiantes sont des liquides visqueux utilisées pour la lubrification des parties mobiles des moteurs et des machines. Ce sont des produits pétroliers qui se décomposent après une période d'utilisation, donc l'huile de lubrification subit plusieurs transformations physico-chimiques dues aux divers phénomènes qui s'y reproduisent. Ces transformations qui font perdre à l'huile les qualités qui lui permettent d'assurer la fonction requise, parmi ces qualités : la viscosité, ce qui entraînent sa dégradation.

Pour mieux comprendre le rôle de la viscosité pour une huile, on a effectué une étude numérique à partir d'un programme codé en fortran et une étude expérimentale réalisée sur un rhéomètre MCR 302. L'huile testée, est une huile multigrade SAE 20W50.

Les principales conclusions sont énumérées ci-dessous :

- (a) L'huile multigrade SAE 20W50 se comporte comme un fluide pseudo plastique à une température de -15°C , et comme un fluide Newtonien pour des températures supérieures à -15°C .
- (b) Les résultats numériques et expérimentaux montrent que la viscosité des huiles multigrades diminuent lorsque la température augmente.
- (c) Les résultats expérimentaux de la variation de la viscosité en fonction de la température sont en accord avec le modèle de Reynolds.

Références bibliographique

- [1] DIABY, Moussa. "Compréhension des mécanismes de formation de dépôts en fond de première gorge de piston de moteurs diesel." Thèse de doctorat, Ecole polytechnique Paris -France, 2009.
- [2] RABHI, Zeyneb. MAMOUNI, Khadidja. "Etude de la possibilité du régénération des huiles moteur usagées par processus de traitement à l'acide." Mémoire de master, Université de Adrar, 2019.
- [3] ERNESTO, André. "Lubrification colloïdale de contacts dlc : du régime stationnaire au régime transitoire application à la zone segments–piston–chemise." Thèse de doctorat, Université de Lyon, France, 2014.
- [4] AYEL J., Lubrifiants : Additifs à action physique ou physiologique, Edition Techniques de l'ingénieur, 2002, B5344.
- [5] IZZA, Hidaya. "Contribution à l'étude de l'extraction par solvant des aromatiques en vue de l'obtention des huiles lubrifiantes.", Thèse de Doctorat Es-science, Université Kasdi Marbah Ouargla, Algérie, 2017.
- [6] RASOLOFONIAINA, Rolland. "Caractérisation physico-chimique d'échantillons d'huiles lubrifiantes neuves et usagées-essais de régénération des huiles usagées". Mémoire, le 28 Juin 2008.
- [7] GIRAUD, Laurent. "Modèle prédictif pour le développement d'un système embarqué de vidange des lubrifiants pour transmission." Thèse de doctorat, Université laval, Canada, Mars 2000.
- [8] LECOMPTE, Matthieu, "Etude expérimentale des sprays d'huile dans un moteur à combustion interne : Influence de l'écoulement de blow-by et participation à la consommation d'huile", Thèse de doctorat, Université de Rouen, France, 2007.
- [9] BENLALLI, Yacine. Modélisation numérique du comportement dynamique d'un film d'huile dans un roulement à billes. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2009.
- [10] NEJJAR, Khalid. "Etude de la réactivité thermique d'une huile de lubrification des moteurs diesel." Thèse de doctorat, Université Mohammed V – Agdal, 2011.
- [11] J.J. O'Connor, J. Boyd, E.A. Avallone, Standard Handbook of Lubrication Engineering, McGraw-Hill Book Company, 1968.

Référence bibliographique

- [12] Frêne J., Nicolas D., Degueurce B., Berthe D., Godet M., "Lubrification hydrodynamique. Paliers et Butées", Editions Eyrolles, Paris, 1990.
- [13] Y. A. Cengel, J. M. Cimbala."Mécanique des fluides". Paris, copyright 2017 par de Boech supérieur.
- [14] C. RIGAL."Comportement de fluides complexes sous écoulement: approche expérimentale par résonance magnétique nucléaire et techniques optiques et simulations numériques", Thèse doctorat, Université de Lorraine, France, 2012.
- [15] A. C. MACHADO."Contribution à la rhéologie des suspensions : migration, rhéoépaississement", Thèse doctorat, Université de Bordeaux, France, 2016.
- [16] A. Guillermic, "Le chauffage par les combustibles liquides", Paris, Edition Technique, 1980.
- [17] J.P. Couderc, C. Gourdon, A. Liné."Phénomènes de transfert en génie des procédés". Edition Technique, Paris, 2008.