



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



Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département de la technologie*

\*\*\*\*\*

MÉMOIRE DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE  
L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

**Master**

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

**Thème**

**Prédiction des caractéristiques, après un  
temps d'usage, d'une huile lubrifiante  
d'un moteur à combustion interne.**

**Réalisé par :**

MEGHAZI Yacine

ABASSI Ikram

**Encadré par :**

Dr. B. KHELIDJ

UDBKM

**Co- Encadré par :**

Dr. F. BOUZEFFOUR

UDES

Année Universitaire 2020/2021



## Résumé

Ce mémoire est rédigé dans le cadre du projet de fin d'études concernant la prédiction des caractéristiques, après un temps d'usage, d'une huile lubrifiante d'un moteur à combustion interne.

Afin de prévenir la surchauffe des pièces métalliques qui entrent en contact les unes avec les autres dans un moteur à combustion interne, on utilise une huile lubrifiante. Cette dernière soumise à de fortes températures, se dégrade et perd progressivement ses propriétés lubrifiantes. Par conséquent elle doit être changée pour éviter la destruction du moteur.

D'une manière générale, les mécanismes lubrifiés sont susceptibles d'être surveillés dans leur fonctionnement par analyse de leur lubrifiant en service. Peut-on donc prédire à temps qu'une huile lubrifiante ne remplit plus sa tâche convenablement après un certain temps d'usage ? Pour répondre à cette problématique, nous nous sommes fixés comme objectif dans ce travail le développement d'un outil de prédiction des caractéristiques d'une huile lubrifiante d'un moteur à combustion interne.

Pour mener à bien ce travail, nous avons dans une première étape fait entre autres plusieurs séries d'analyses rhéologiques sur une huile lubrifiante de fabrication nationale pour moteur à combustion interne et dans une deuxième étape une étude numérique par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels pour la prédiction des caractéristiques de l'huile lubrifiante usagée.

Les premiers résultats obtenus sont particulièrement prometteurs. Ils contribueront à une meilleure compréhension de l'altération de l'huile de lubrification dans les moteurs à combustion interne, à prédire et à déceler des anomalies caractéristiques telles que la contamination par des particules internes à l'équipement ou le type d'usure par exemple pour faire de la maintenance préventive.

**Mots-clés :** Moteur à combustion interne ; Huile lubrifiante ; Analyses rhéologiques ; Prédiction ; Réseaux de neurones.

## Abstract

This memory is written as part of the end of studies project concerning the prediction of the characteristics, after a period of use, of a lubricating oil of an internal combustion engine.

In order to prevent overheating of metal parts that come into contact with each other in an internal combustion engine, lubricating oil is used. The latter subjected to high temperatures, degrades and gradually loses its lubricating properties. Therefore it must be changed to avoid destruction of the engine.

In general, lubricated mechanisms are likely to be monitored in their operation by analyzing their lubricant in service. Can we therefore predict in time that a lubricating oil no longer performs its task properly after a certain period of use ? To respond to this problem, we have set ourselves the objective in this work of developing a tool for predicting the characteristics of a lubricating oil in an internal combustion engine.

To carry out this work, we have in a first step made among other things several series of rheological analyzes on a lubricating oil of national manufacture for internal combustion engine and in a second step a numerical study by the application of the approach of artificial neural networks for predicting the characteristics of used lubricating oil.

The first results obtained are particularly promising. They will contribute to a better understanding of the spoilage of lubricating oil in internal combustion engines, to predict and detect characteristic anomalies such as contamination by particles internal to the equipment or the type of wear by example to do preventive maintenance.

**Keywords :** Internal combustion engine ; Lubricating oil ; Rheological analyzes ; Prediction ; Neural networks.

## ملخص

تمت كتابة هذه أطروحة كجزء من مشروع نهاية الدراسات المتعلقة بالتنبؤ بالخصائص، بعد فترة من الاستخدام ، لزيت التشحيم لمحرك الاحتراق الداخلي.

من أجل منع ارتفاع درجة حرارة الأجزاء المعدنية التي تتلامس مع بعضها البعض في محرك الاحتراق الداخلي ، يتم استخدام زيت التشحيم. هذا الأخير يتعرض لدرجات حرارة عالية ويتحلل ويفقد تدريجياً خصائص التشحيم. لذلك يجب تغييره لتجنب تدمير المحرك.

بشكل عام ، من المرجح أن تتم مراقبة آليات التشحيم أثناء تشغيلها من خلال تحليل مواد التشحيم الخاصة بها أثناء الخدمة. هل يمكننا إذن أن نتوقع في الوقت المناسب أن زيت التشحيم لم يعد يؤدي مهمته بشكل صحيح بعد فترة معينة من الاستخدام؟ للرد على هذه المشكلة ، وضعنا لأنفسنا الهدف في هذا العمل لتطوير أداة للتنبؤ بخصائص زيت التشحيم في محرك الاحتراق الداخلي.

لتنفيذ هذا العمل ، قمنا في الخطوة الأولى ، من بين أمور أخرى ، بإجراء عدة سلسلة من التحليلات الريولوجية على زيت تشحيم من صنع وطني لمحرك الاحتراق الداخلي وفي الخطوة الثانية دراسة رقمية عن طريق تطبيق نهج الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ بخصائص زيت التشحيم المستخدم.

النتائج الأولى التي تم الحصول عليها واعدة بشكل خاص. سوف يساهمون في فهم أفضل لتلف زيت التشحيم في محركات الاحتراق الداخلي ، للتنبؤ واكتشاف الشذوذ المميز مثل التلوث بالجسيمات الداخلية للمعدات أو نوع التآكل بالقدوة للقيام بالصيانة الوقائية.

كلمات البحث: محرك الاحتراق الداخلي ؛ زيت التشحيم؛ التحليلات الريولوجية؛ تنبؤ؛ الشبكات العصبية.

## Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire :

À mes très chers parents,

À mes sœurs, mon frère, mes tantes et oncles.

À tous mes enseignants.

À tous mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

**MEGHAZI Yacine**

# Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

À mes très chers parents,

À mes sœurs, À mes grands-parents, mes tantes et oncles.

À tous mes enseignants du département de technologie.

À mes amies pour leurs soutiens et leurs éloges.

**ABASSI IKRAM**

## Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné la force et le courage pour mener à bien la rédaction de ce modeste mémoire.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre directeur, de mémoire de Projet de Fin d'Etudes, le docteur B. KHELIDJ ainsi que notre co-directeur de mémoire le docteur F. BOUZEFFOUR, qui ont accepté d'être les promoteurs de notre projet.

Nous tenons aussi à leur exprimer toute notre gratitude pour la confiance, les encouragements et la liberté qu'ils nous ont accordé durant tout le temps de la réalisation de notre mémoire et pour les idées et les critiques très constructives qu'ils nous ont fournies ainsi que pour leur disponibilité.

Nous exprimons un immense merci aux docteurs MAZOUZI Redha et BOUDJEMAA Fatiha pour leur aide très précieuse.

Nous remercions également tous nos professeurs des années précédentes et en particulier ceux du département de la technologie.

Enfin, nos remerciements vont à tous ceux qui de près ou de loin nous ont apporté leur soutien et leur aide.

<i>Résumé</i>	I
<i>Dédicaces</i>	II
<i>Remerciements</i>	III
<i>Table des matières</i>	IV
<i>Listes des figures et des tableaux</i>	V
<i>Nomenclature</i>	VI
<b>Introduction générale</b>	1
<b>Chapitre I: Etude bibliographique</b>	
<b>I.1- Le moteur Diesel</b>	3
I.1.1. Principe de fonctionnement	3
I.2.2. La composition des lubrifiants	6
<b>I.2- La lubrification du moteur thermique</b>	11
I.2.1. La lubrification	11
I.2.2. La composition des lubrifiants	11
I.2.3. La dégradation des huiles moteur	14
<b>I.3- Généralités sur la rhéologie</b>	16
I.3.1. Mouvements laminaires et contraintes de cisaillement	16
I.3.2. Déformation et vitesse de cisaillement	17
I.3.3. Équation rhéologique d'état, rhéogrammes	21
I.3.4. Viscosités	22
I.3.5. Limites du régime laminaire – Nombre de Reynolds	25
<b>Chapitre II: Modélisation et réseaux de neurones</b>	
<b>II.1- Matlab</b>	27
<b>II.2- L'interface principale</b>	28
<b>II.3- Implémentation d'un R-D-N dans Matlab</b>	29
<b>II.4- Réseaux de neurones</b>	29
<b>II.5- Architecture des réseaux de neurones</b>	31
<b>II.6- Domaines d'applications</b>	32

## Table des matières

---

<b>II.7-</b> Caractéristiques des Réseaux de Neurones Artificiels	32
II.7.1. Présentation	32
II.7.2. Les entrées	32
II.7.3. Les fonctions d'activations	33
II.7.4. Évaluation du modèle neuronal	33
<b>II.8-</b> Algorithme d'apprentissage	33
<b>Chapitre III: Etude expérimentale</b>	
<b>III.1-</b> Le rhéomètre	36
III.1.1. Présentation	36
III.1.2. Le rhéomètre rotatif	37
III.1.3. Principe de mesure	38
<b>III.2-</b> Présentation de la poudre de charbon	38
<b>III.3-</b> Présentation de l'huile SAE 15W40	40
<b>III.4-</b> Préparation des échantillons	41
<b>III.5-</b> Déroulement des essais	43
<b>Chapitre IV: Résultats et discussion</b>	
<b>IV.1-</b> Identification du comportement rhéologique d'un fluide	44
<b>IV.2-</b> Comportement rhéologique d'une huile neuve CHELIA 15W40	45
<b>IV.3-</b> Comportement rhéologique de l'huile CHELIA 15W40 polluée	47
<b>IV.4-</b> Réponses des tests dynamiques	48
<b>IV.5-</b> Réponses des tests de rampe de températures	53
<b>IV.6-</b> Résultats de prédiction par les réseaux de neurones	55
IV.6.1. Modélisation de la viscosité	58
IV.6.2. Comparaison des résultats expérimentaux et prédicts	59
<b>Conclusion générale</b>	61
<b>Références Bibliographiques</b>	63

### Liste des figures

Numéro	Titre	Page
<b>Fig. I.1</b>	Schéma d'un cycle de moteur à quatre temps	4
<b>Fig. I.2</b>	Forces de frottement s'exerçant sur deux couches adjacentes lors d'un t	17
<b>Fig. I.3</b>	Gradient de déplacement dans un mouvement de cisaillement plan.	18
<b>Fig. I.4</b>	Interprétation géométrique de $\gamma$	19
<b>Fig. I.5</b>	Interprétation géométrique de $\varepsilon$ dans un cas particulier.	20
<b>Fig. I.6</b>	Exemple de rhéogramme	23
<b>Fig. I.7</b>	Rhéogramme Newtonien.	24
<b>Fig. II.1</b>	Interface du software Matlab	28
<b>Fig. II.2</b>	Interface Matlab principale.	28
<b>Fig. II.3</b>	Neurone biologique	30
<b>Fig. II.4</b>	Modèle non linéaire d'un neurone	30
<b>Fig. II.5</b>	Structure d'un perceptron multicouche	32
<b>Fig. II.6</b>	Apprentissage supervisé	34
<b>Fig. III.1</b>	Rhéomètre Anton Paar MCR 302	36
<b>Fig. III.2</b>	Géométrie cylindres coaxiaux	37
<b>Fig. III.3</b>	Géométrie plan-plan	37
<b>Fig. III.4</b>	Différentes géométries de rhéomètre	37
<b>Fig. III.5</b>	Photographie de poudre de charbon	39
<b>Fig. III.6</b>	Photographie de l'emballage commercial de l'huile CHELIA.	40
<b>Fig. III.7</b>	Balance de précision	42
<b>Fig. III.8</b>	Agitateur magnétique	42

## Listes des figures et des tableaux

<b>Fig. III.9</b>	Photographie des différents échantillons préparés	43
<b>Fig. III.10</b>	Photographie du dépôt de l'échantillon à tester	43
<b>Fig. IV.1</b>	Diagramme caractéristique des fluides newtoniens	45
<b>Fig. IV.2</b>	Diagramme caractéristique des fluides non- newtoniens	45
<b>Fig. IV.3</b>	Variations de la viscosité apparente en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour l'huile CHELIA 15W40.	46
<b>Fig. IV.4</b>	Variations de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour l'huile CHELIA 15W40	46
<b>Fig. IV.5</b>	Variations de la viscosité apparente en fonction de la température de l'huile CHELIA 15W40.	47
<b>Fig. IV.6</b>	Variations de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 0.25% en polluant.	48
<b>Fig. IV.7</b>	Variations de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 1%	48
<b>Fig. IV.8</b>	Variations de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 2%	49
<b>Fig. IV.9</b>	Variations de la viscosité apparente en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 0.25% en polluant	50
<b>Fig. IV.10</b>	Variations de la viscosité apparente en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 1% en polluant	50
<b>Fig. IV.11</b>	Variations de la viscosité apparente en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 2% en polluant.	51

<b>Fig. IV.12</b>	Comparaison entre les paramètres viscoélastiques ( $G'$ et $G''$ ) pour une fraction massique de 0.25% en polluant.	52
<b>Fig. IV.13</b>	Comparaison entre les paramètres viscoélastiques ( $G'$ et $G''$ ) pour une fraction massique de 1% en polluant.	52
<b>Fig. IV.14</b>	Comparaison entre les paramètres viscoélastiques ( $G'$ et $G''$ ) pour une fraction massique de 2% en polluant.	53
<b>Fig. IV.15</b>	Variation de la viscosité apparente en fonction de la température de l'huile moteur 15W40 et pour deux fractions massiques 0.25% et 1%.	54

## Listes des figures et des tableaux

<b>Fig. IV.16</b>	Variations de la viscosité apparente en fonction des différentes températures pour l'huile CHELIA 15W40 à 0.25% ; 0.75% ;1.25% ;1.75% et 2%.	55
<b>Fig. IV.17</b>	Les paramètres utilisés par le modèle neuronal	55
<b>Fig. IV.18</b>	Variables d'entrées utilisés pour prédire la viscosité d'huile	56
<b>Fig. IV.19</b>	Structure du réseau de neurones pour prédire la viscosité d'huile 15W40	57
<b>Fig. IV.20</b>	Erreur quadratique moyenne pour la formation, validation et de test	58
<b>Fig. IV.21</b>	Coefficient de régression obtenu lors de la formation, validation et test.	59
<b>Fig. IV.22</b>	Comparaison des viscosités expérimentales et prédites	60

## Liste des tableaux

<b>Numéro</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau III.1</b>	Caractéristiques de charbons de bois destinés à la sidérurgie	39
<b>Tableau III.2</b>	Caractéristiques physico-chimiques de l'huile CHELIA 15W40	40
<b>Tableau III.3</b>	Masses et fractions massiques de la matière carbonneuse d'un échantillon.	41

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
<b>A, n, B</b>	Constantes dépendant de la composition du carburant	[-]
$\delta$	Délai d'allumage	[ms]
<b>P</b>	Pression	[kPa]
<b>T</b>	Température	[°C]
<b>R</b>	Constante des gaz parfaits	[J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	Coefficient d'excès d'air	[-]
$\tau$	Contrainte de cisaillement s'exerçant sur le fluide	[Pa]
$\gamma$	Taux de cisaillement	[s <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	Déformation de cisaillement	[s <sup>-1</sup> ]
$\mu$	Vitesse relative des surfaces	[ms. <sup>-1</sup> ]
$\tau$	Contrainte de cisaillement s'exerçant sur le fluide	[Pa]
$\eta$	Viscosité dynamique	[Pa.s]
$\nu$	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Masse volumique	[kg. m <sup>-3</sup> ]
$v_k$	Sortie du combineur linéaire due aux signaux d'entrées	[-]
$b_k$	Biais	[-]
$y_k$	Signal de sortie du neurone	[-]
$y_p$	Sorties de réseau	[-]
$y_d$	Données désirées	[-]
MSE	Erreur quadratique moyenne	[-]
n	Nombre des données	[-]
<b>R</b>	Coefficient de détermination	[-]
<b>Sp</b>	Partie de sortie prédictive par le réseau	[-]
<b>Sr</b>	Sortie de données réelles	[-]
$m_p$	Masse de particule	[kg]
$m_h$	Masse d'huile	[kg]



---

*Introduction Générale*

---



## Introduction générale

---

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons choisi le sujet sur la prédiction des caractéristiques d'une huile usagée d'un moteur à combustion interne car nous avons voulu d'une part approfondir nos connaissances en rhéologie et d'autre part à s'initier à la modélisation et à la simulation à l'aide des réseaux de neurones. Ces deniers peuvent s'intégrer dans un calculateur pour gérer la longévité de la voiture de demain.

Les huiles minérales synthétisées et raffinées sont particulièrement courantes dans l'industrie automobile comme huiles lubrifiantes, par exemple, pour garantir la meilleure performance des moteurs et des transmissions. Ces huiles doivent résister à des conditions ambiantes variées pendant leur vie utile allant du démarrage à froid du moteur aux hautes températures et pressions produites lors du fonctionnement. La tâche de ces huiles utiles est donc de répondre à tous ces défis sans perdre les propriétés requises.

Pour protéger un moteur à combustion interne des risques de destruction liée à son huile de lubrification, cette dernière doit être changée dès qu'elle ne joue plus son rôle. Aujourd'hui la vidange se fait soit au bout d'un certain nombre de kilomètres, soit au bout d'un certain temps. Or les caractéristiques d'une huile lubrifiante ne sont pas fonction que du temps ou des kilomètres parcourus et peuvent changer donc à cause d'une mauvaise utilisation par exemple les accélérations à froid d'un moteur. Peut-on donc prédire à temps qu'une huile lubrifiante d'un moteur ne remplit plus sa tâche convenablement après un certain temps d'usage ? Peut-on optimiser le temps d'utilisation de l'huile lubrifiante d'un moteur à combustion interne ?

Afin d'apporter notre contribution à mieux comprendre la dégradation de l'huile de lubrification d'un moteur à combustion interne, nous nous sommes intéressés dans ce travail à faire une série d'analyses rhéologiques sur une huile à laquelle on rajoute de la poudre de charbon pour simuler une huile polluée. Les résultats de ces essais ont été utilisés pour prédire la dégradation de l'huile par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels.

Le présent document est subdivisé en quatre chapitres :

## Introduction générale

---

Dans le premier chapitre nous présentons une étude bibliographique sur le moteur diésel et la lubrification, ainsi que des généralités sur la rhéologie.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du phénomène de dégradation des huiles moteur par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels. Nous utilisons l'environnement de MATLAB Tools (Neural network toolbox), pour simuler la dégradation des huiles dans un moteur.

Dans le troisième chapitre nous présentons l'étude expérimentale où nous décrivons la préparation des échantillons et le déroulement des essais.

Dans le quatrième chapitre nous présentons l'essentiel des résultats expérimentaux et numériques qui comportent entre autres l'évolution de la viscosité d'une huile en fonction de la pollution.

Enfin, nous terminons la rédaction de ce mémoire de fin d'études par une conclusion générale.



---

# Chapitre I

Étude bibliographique

---



## **Introduction**

Dans un moteur thermique, les pièces en contact sont une source de perte d'énergie non négligeable. Malgré les nombreux progrès technologiques réalisés en vue d'augmenter le rendement des moteurs, ces derniers sont toujours en évolution pour des raisons principalement économiques et environnementales.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur le moteur thermique diesel et la lubrification qui a pour but de diminuer les pertes par frottements et réduire l'usure du moteur afin d'augmenter sa longévité.

### **I.1. Le moteur diesel**

#### **I.1.1 Principe de fonctionnement**

##### **a.\_ Le cycle Diesel**

Le cycle Diesel d'un moteur à quatre temps comporte [1] :

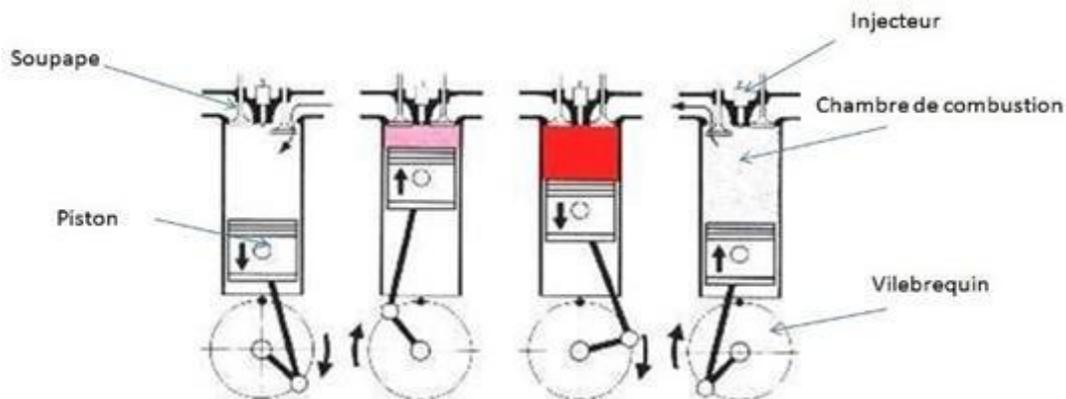
- L'admission : La soupape d'admission s'ouvre et le piston descend en aspirant l'air frais.

- La compression : La remontée du piston entraîne la compression de l'air avec un rapport volumétrique élevé. En dépit des pertes thermiques aux parois, la température de fin de compression est de 600°C à 1500°C. En fin de compression, le carburant est injecté sous forme d'un ou plusieurs jets pulvérisés dans le cylindre (au voisinage du point mort haut).

- La combustion et détente : Dès son injection, le carburant s'enflamme presque instantanément, sans qu'il ne soit nécessaire de recourir à un allumage commandé par bougie. La combustion rapide qui s'ensuit constitue le temps moteur. En brûlant, le mélange augmente fortement la température et la pression dans le cylindre (60 à 200 bars), repoussant le piston qui fournit une force de travail sur une bielle, laquelle entraîne la rotation du vilebrequin.

- L'échappement : Le piston remonte et évacue les gaz brûlés par la soupape d'échappement.

Dans un moteur quatre temps, le cycle de fonctionnement correspond à deux tours de vilebrequin, c'est-à-dire deux montées et descentes du piston comme le montre la figure (I.1).



Admission Compression Combustion Échappement

**Fig. I.1 :** Schéma d'un cycle de moteur à quatre temps [2]

La combustion dans un moteur Diesel diffère de celle d'un moteur à essence par le fait que, l'allumage se fait par compression et la combustion est pilotée par la diffusion de l'air dans le combustible. Le mécanisme de mélange entre l'air et le combustible introduit est essentiel pour l'échauffement du combustible jusqu'à son auto-inflammation et sa combustion.

**b.\_ L'auto-inflammation**

La combustion Diesel repose sur l'auto-inflammation du carburant dans de l'air comprimé. L'auto-inflammation se produit lorsque la température du mélange de combustible et d'air dépasse une certaine température appelée « température d'auto-inflammation ». Pour des températures inférieures à cette dernière, le combustible mélangé à l'air s'oxyde pour donner des peroxydes dont la concentration croît avec la température. À partir du moment où une concentration critique en peroxydes est atteinte, les réactions chimiques deviennent instables ; puis par un mécanisme de

réactions en chaîne, elles s'emballent pour donner une combustion vive. La température d'auto-inflammation qui donne lieu à cet emballement dépend de la nature du combustible et sa structure moléculaire [3].

### **c. \_ Le délai d'allumage**

L'inflammation n'est pas instantanée dans le cas des moteurs Diesel. Le temps pendant lequel le système doit être maintenu dans des conditions fixées de pression et de température avant d'observer l'inflammation proprement dite est le *délai d'allumage*. Ce dernier est composé d'un délai d'ordre physique et d'un délai d'ordre chimique [4].

Au cours du délai physique, le combustible, à une température faible (30 à 80°C), est injecté dans l'air contenu dans la chambre de combustion dont la température a été élevée par compression au-dessus de la température d'auto-inflammation. Le mélange entre l'air chaud et le jet de combustible entraîne la vaporisation des gouttelettes. Les températures de la vapeur sont trop faibles pour que les réactions d'oxydation puissent avoir lieu de manière sensible.

Le délai chimique est lié essentiellement à la cinétique des processus chimiques. Lorsque la vapeur de combustible atteint des températures supérieures à la température d'auto-inflammation, un petit laps de temps est encore nécessaire pour que la concentration critique en peroxydes puisse être atteinte et provoquer l'inflammation. L'allumage a lieu en périphérie du jet, en un ou plusieurs points, là où les concentrations critiques en peroxydes sont d'abord atteintes. Au voisinage de ce point, les concentrations en peroxydes sont proches du seuil critique. La chaleur dégagée par la combustion d'un premier point permet donc très rapidement d'enflammer son voisinage immédiat qui est presque prêt à s'enflammer spontanément. La flamme se propage très rapidement, en 1 à 2 degrés vilebrequin, à l'ensemble du jet.

Il n'existe pas de frontière nette entre les phases physiques et chimiques du délai. Ces deux processus se chevauchent et s'influencent mutuellement. Seules des valeurs du délai total peuvent être données. Pour des températures supérieures à 600°C, les délais sont inférieurs à 0,4 ms [3]. Les modèles les plus fréquemment proposés qui permettent d'estimer le délai d'auto-inflammation tiennent compte des phénomènes de

cinétique chimique en milieu homogène gazeux. Le plus élémentaire d'entre eux [5] propose une formulation du type Arrhenius à une seule équation :

$$\delta = A. P^{-n}. \exp\left(\frac{B}{RT}\right) \quad (\text{I.1})$$

Avec «  $\delta$  » le délai d'allumage et où les termes  $A$ ,  $n$ ,  $B$ , transportent les informations relatives à la fois aux processus physiques et chimiques ;  $P$  et  $T$  correspondent respectivement à la pression et la température de la chambre de combustion et  $R$  à la constante des gaz parfaits.

L'importance du délai d'allumage sur le déroulement de la combustion impose pour les moteurs Diesel l'utilisation d'un carburant qui présente une structure favorable à l'auto-inflammation. Cette qualité s'exprime par l'indice de cétane.

### **I.1.2 Combustion et formation des polluants**

#### **a.\_ Combustion dans un moteur diesel**

Il est possible de distinguer trois phases entre le début et la fin de la combustion [28].

Dans la première phase, l'injection à très haute pression pulvérise finement le carburant qui progresse dans la chambre sous la forme d'un jet de liquide immédiatement vaporisé par la température de fin de compression. La partie liquide du jet continue sa pénétration pendant que la partie vapeur est entraînée par le mouvement de rotation de la masse d'air autour de l'axe du cylindre dans le bol du piston (*swirl*) et se mélange à l'air.

Dans la deuxième, toute la partie vaporisée et mélangée à l'air se trouve en situation de prémélange et brûle très brutalement dès que le délai d'inflammation est écoulé. La montée en pression rapide qui en résulte provoque le bruit typique du moteur Diesel.

Enfin dans la troisième, la combustion se poursuit en étant limitée dans ses réactions par la surface de mise en contact du carburant et de l'air résiduel. La combustion se fait alors par diffusion. La majeure partie du carburant est ainsi brûlée avec une vitesse de combustion contrôlée par le taux d'introduction du carburant.

La réaction globale de combustion se décrit sous la forme d'une équation chimique qui tient compte de la composition initiale du mélange de réactifs. Le processus de réaction fait intervenir une succession d'un nombre très élevé de réactions élémentaires en chaîne dont chacune ne met en jeu que deux ou au maximum trois espèces qui sont soit des molécules stables, soit plus généralement des radicaux libres.

La combustion complète conduit à la formation de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et d'eau (H<sub>2</sub>O) ; l'azote (N<sub>2</sub>) se comportant comme un gaz inerte.

Pour mieux comprendre les phénomènes de combustion dans les moteurs en général, et plus particulièrement dans les moteurs Diesel, il est important de rappeler la notion de richesse en carburant ( $\Phi$ ), qui est l'inverse du coefficient d'excès d'air ( $\lambda$ ). En effet, le coefficient d'excès d'air «  $\lambda$  » s'exprime par la relation :

$$\lambda = \frac{\frac{m_{air}}{m_{carb}}}{\left(\frac{m_{air}}{m_{air}}\right)_{sto}} \quad (I.2)$$

Où  $\left(\frac{m_{air}}{m_{air}}\right)$  correspond au rapport de la masse d'air par la masse de carburant effectivement utilisés dans la chambre de combustion et  $\left(\frac{m_{air}}{m_{air}}\right)_{sto}$  correspond au même rapport pris pour un mélange stœchiométrique d'air et de carburant. À la stœchiométrie, l'excès d'air «  $\lambda$  » est égal à 1.

L'équation de la réaction de combustion d'un hydrocarbure de formule brute C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> à la stœchiométrie s'écrit :



Où  $\Delta H_c$  est l'enthalpie de combustion

En réalité, les moteurs Diesel fonctionnent en mélange pauvre, c'est-à-dire que le coefficient d'excès d'air «  $\lambda$  » est toujours supérieur à 1 et la richesse en carburant «  $\Phi$  » toujours inférieure à 1. Par conséquent, le gaz de combustion contient toujours une fraction importante de dioxygène.

Par ailleurs, la composition du mélange de gaz brûlés est assez complexe, puisque la réaction de combustion n'est jamais complète à cause de l'hétérogénéité du

mélange air – gazole, des variations très rapides de la température et de la durée très faible laissée aux processus chimiques d'oxydation. De plus, le gazole modélisé par un hydrocarbure est en réalité un mélange complexe qui contient outre les hydrocarbures, des composés soufrés, nitrés, et diverses sortes d'additifs qui lui confèrent des propriétés spécifiques. Ces conditions expliquent la nature des produits de combustion observés à l'échappement et la présence dans le gaz d'échappement de composés polluants.

### **b.\_ Formation des polluants**

Lors de la combustion Diesel, les polluants émis sont : le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC) imbrûlés, les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), et les particules de suies<sup>25</sup>.

#### ➤ Formation du monoxyde de carbone (CO)

Elle intervient comme une étape intermédiaire essentielle du processus d'oxydation des hydrocarbures conduisant au produit final CO<sub>2</sub> [6]. En réalité, la vitesse d'oxydation du combustible dépend de la concentration disponible en oxygène, de la température des gaz et du temps disponible laissé aux réactions pour s'accomplir.

Le paramètre essentiel régissant les émissions de monoxyde de carbone est la richesse du mélange carburé. En mélange riche, les concentrations en monoxyde de carbone augmentent régulièrement avec la richesse ; le défaut d'oxygène entraîne une combustion incomplète.

Comme les moteurs Diesel fonctionnent toujours en mélange globalement pauvre (excès d'O<sub>2</sub>), les émissions de monoxyde de carbone y sont nettement plus faibles que celles du moteur à essence.

#### ➤ Formation des hydrocarbures imbrûlés (HC)

L'émission d'hydrocarbures imbrûlés provient de la combustion incomplète des hydrocarbures. Contrairement au monoxyde de carbone et aux NO<sub>x</sub>, qui se forment en phase homogène à haute température au sein du fluide, les hydrocarbures imbrûlés proviennent plutôt d'effets hétérogènes dans le mélange au voisinage des parois, donc à température plus basse.

➤ Formation des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)

Les oxydes d'azote, qui représentent l'ensemble des molécules NO, NO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O, sont produits lors de la combustion dans le moteur. Ces molécules ont des origines diverses [7] :

- le NO précoce, qui est formé à l'aide de radicaux hydrocarbures,
- et le NO thermique, qui représente le mécanisme de formation de NO le plus important dans les moteurs.

Comme la combustion dans un moteur Diesel est hétérogène, même si le mélange est globalement très pauvre en carburant, il y a toujours des zones de la charge gazeuse où le mélange est au voisinage de la stœchiométrie. La formation de NO se produit dans ces zones par simple effet d'augmentation de la température de l'air.

➤ Formation des suies et des particules solides

La formation des suies et des particules solides dans les moteurs diesel est due au mode de combustion par diffusion utilisé dans ces moteurs. Plusieurs mécanismes sont impliqués dans la formation de ces suies.

➤ Formation des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont des composés aromatiques comportant plus de deux et jusqu'à six noyaux benzéniques condensés.

L'étape cinétiquement déterminante du mécanisme de formation des hydrocarbures aromatiques polycycliques est la formation du premier noyau aromatique [8] : le benzène (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>).

### **I.1.3 Les polluants et l'environnement**

Aujourd'hui, il est reconnu que les polluants émis dans les gaz d'échappement des voitures sont très néfastes pour la santé et pour l'environnement.

#### **a. \_ L'effet des hydrocarbures imbrûlés**

Des hydrocarbures imbrûlés, ce sont essentiellement les composés insaturés qui ont des effets sur la santé. Les oléfines, par exemple, sont susceptibles de subir des

conversions métaboliques partielles qui les transforment en époxydes génotoxiques [9]. Toutefois, les aldéhydes sont connus comme des gaz irritants, d'autant plus toxiques que leurs masses moléculaires sont faibles. C'est le cas du formaldéhyde qui irrite les muqueuses oculaires, la gorge et les bronches [10].

D'autre part, les hydrocarbures aromatiques polycycliques détectés à l'échappement des voitures possèdent plus ou moins une activité mutagène et cancérigène. Les composés à 4 noyaux aromatiques ou plus, sont généralement les plus cancérigènes [11].

### **b. \_ L'effet des oxydes d'azote**

De tous les oxydes d'azote, le dioxyde d'azote est celui qui présente le plus de risques. Très peu soluble, il peut pénétrer profondément dans les plus fines ramifications du système pulmonaire [12]. Il agit au niveau des alvéoles pulmonaires, et conduit à l'altération de leurs structures [13]. Le dioxyde d'azote peut provoquer la mort de cellules spécifiques au sein du poumon et altérer la régulation des fonctions pulmonaires [14].

D'un autre côté les oxydes d'azote émis produisent l'ozone troposphérique (responsable du SMOG) par des réactions chimiques avec les hydrocarbures présents dans l'atmosphère. Ils prennent aussi part à la formation de pluies acides [15].

### **c. \_ L'effet des particules**

Plusieurs études épidémiologiques réalisées dans la dernière décennie, à la fois aux Etats-Unis et en Europe, ont montré que l'exposition aux fines particules (diamètre < 2,5 µm) augmente les taux de mortalité due aux maladies du cœur et des poumons [16]. Les particules dont le diamètre est compris entre 3 et 10 µm peuvent se déposer au niveau de l'arbre respiratoire trachéo-bronchique et provoquer à terme des irritations de la muqueuse respiratoire ou des allergies respiratoires, voire de l'asthme.

Compte tenu des effets néfastes sur la santé et l'atmosphère, les émissions automobiles font aujourd'hui l'objet, dans la plupart des pays industrialisés, de mesures réglementaires. A noter que la réduction des émissions d'oxydes d'azote et de particules demeurent le véritable défi à relever dans le cas de la motorisation Diesel.

## **I.2. La lubrification du moteur thermique**

### **I.2.1 La lubrification**

#### **a. \_ Le rôle du lubrifiant**

La lubrification est primordiale au bon fonctionnement du moteur. Les lubrifiants doivent assurer le bon fonctionnement des mécanismes en s'intercalant entre les surfaces en mouvement relatif [17]. Ils assurent donc la tenue mécanique, diminuent les résistances dues aux frottements et limitent l'usure des pièces en mouvement. D'autre part, une lubrification optimisée augmente le rendement en limitant les pertes mécaniques dues aux frottements. Toutefois, la lubrification couvre d'autres fonctions telles que l'évacuation de la chaleur ou encore la protection contre l'oxydation et la corrosion.

#### **b. \_ Les modes de lubrification**

Dans un moteur à quatre temps, les éléments sont lubrifiés de différentes manières [18] : par barbotage, sous pression ou par projection.

- On parle de lubrification par barbotage lorsque le moteur est lubrifié par un bain d'huile dans le carter ; les pièces en mouvement projettent de l'huile sur les accessoires situés au-dessus du niveau d'huile. Ce système ne convient qu'à des moteurs peu sollicités.
- L'huile provenant de la rampe principale de lubrification est dirigée par des canaux vers les paliers de vilebrequin. Les rainures des coussinets et un canal oblique permettent la lubrification sous pression des têtes de bielle. Dans certains cas l'axe du piston est lubrifié sous pression grâce à un perçage pratiqué dans le corps de bielle.
- L'huile sous pression s'échappant des manetons du vilebrequin est projetée le long des parois de la chemise. Elle assure ainsi la lubrification entre le piston et la chemise, ainsi que l'axe du piston.

### **I.2.2 La composition des lubrifiants**

Pour protéger le moteur, les lubrifiants actuels se composent généralement d'un mélange de bases minérales et synthétiques auxquelles on rajoute une quantité d'additifs dont la teneur est comprise entre 2% et 25% pour les dernières huiles

multigrades pour moteurs Diesel fortement suralimentés. L'huile de base sert de matrice pour constituer « l'ossature » du lubrifiant et elle doit avoir des caractéristiques aussi proches que possibles de celles du lubrifiant visé. Les additifs viennent alors renforcer ou apporter des propriétés supplémentaires aux huiles de base. Les lubrifiants modernes pour moteur peuvent ainsi être constitués de trois à quatre huiles de base différentes, et jusqu'à une quinzaine d'additifs divers.

#### **a. \_ Les huiles de base**

Les huiles de bases sont de plusieurs sortes. On distingue [19] :

- Les huiles de base « minérales », produite selon les procédés traditionnels de raffinage du pétrole brut.
- Les huiles de base minérales « non conventionnelles », produites au moyen de procédés de raffinage particuliers (hydro - raffinage, hydro - craquage, ou hydro - isomérisation).
- Les huiles de base minérales provenant de la régénération (re-raffinage).
- Les huiles de base de synthèse (les Poly-Alpha-Oléfines hydrogénées PAO, les Polyoléfines internes POI, les Poly-isobutènes PIB, les esters et les polyglycols).

#### **b. \_ Les additifs**

Ils sont nombreux et de toutes sortes, chacun ayant une fonction bien définie. Certains servent à atteindre le niveau de performance voulu pour un lubrifiant et d'autres servent à corriger un défaut ou améliorer les propriétés rhéologiques de l'huile. Dans la formulation, les additifs peuvent composer jusqu'à 25% de la masse totale du lubrifiant.

Les rôles de certains de ces additifs [20 ;21] sont comme suit :

- Les *anti-oxydants* : Ils résistent à l'oxydation des huiles et allongent la durée de vie du lubrifiant.

- Les détergents : Ils assurent un bon état de propreté des pièces. Ces additifs possèdent un pH basique ou neutre pour prévenir de la formation des dépôts à chaud sur les surfaces et pour maintenir la propreté des circuits de distribution.

**Les dispersants :** Ce sont des produits entièrement organiques qui comportent une tête polaire et une chaîne lipophile. Ils servent à mettre en suspension dans l'huile des impuretés solides (suies, poussières, métaux d'usure) formées au cours du fonctionnement des moteurs. Ces composés agissent en empêchant les résidus solides de s'agglomérer et évitent ainsi le risque de dépôts (boues) dans les parties froides du moteur.

- Les *anti-usures* :

Ils agissent en formant un film protecteur autolubrifiant sur les surfaces en contact.

- Les *anti-rouilles* :

Ils protègent contre la corrosion humide. Ce rôle est aussi assuré par les détergents et dispersants.

- Les *additifs anti-corrosifs* :

Ils forment un film protecteur de passivation contre la corrosion acide provenant des gaz de combustion. Ce rôle est aussi assuré par les détergents et dispersants.

- Les *améliorants d'indice de viscosité* :

Ils épaississent le lubrifiant quand la température augmente, cela remédie partiellement à la chute de viscosité enregistrée à chaud sans trop perturber le comportement rhéologique à basse température.

- Les *abaisseurs de point d'écoulement* :

Les abaisseurs de point d'écoulement (température minimale pour laquelle l'huile coule encore) servent à perturber le processus de cristallisation des paraffines contenues dans les huiles de base. On a donc une meilleure fluidité du lubrifiant à basse température.

- Les *anti-mousses* :

Ils permettent de corriger la tendance au moussage du lubrifiant (à cause des dispersants et détergents). Ils agissent en s'intercalant à l'interface liquide/air et préviennent du fait de leur faible tension de surface la formation de mousse stable par coalescence rapide des bulles d'air.

➤ *Les réducteurs de frottements :*

Ils réduisent le coefficient de frottement grâce à des composés polaires qui s'adsorbent sur les surfaces métalliques pour former un film anti-frottement à faible résistance au cisaillement.

En dépit de la présence de ces nombreux additifs dans les lubrifiants sensés lutter contre leur dégradation, on observe dans les moteurs Diesel actuels, fonctionnant dans les conditions d'EGR (recirculation des gaz d'échappement), un vieillissement important du lubrifiant et une accumulation de dépôts à divers endroits du moteur.

L'étude des mécanismes de dégradation des lubrifiants pour moteur a fait l'objet de nombreuses études. Ces mécanismes de dégradation intéressent aussi bien les constructeurs automobiles que les fournisseurs d'huiles moteur.

### **I.2.3 La dégradation des huiles moteur**

Les huiles moteur ont une formulation assez complexe avec un grand nombre d'additifs visant à doper les propriétés et caractéristiques des huiles de base. Cela se justifie par le besoin de satisfaire les contraintes de plus en plus sévères auxquelles ces huiles sont soumises dans les moteurs Diesel.

#### **a. \_ Les contraintes imposées au moteur**

Elles sont de plusieurs types. Certaines de ces contraintes ont évolué avec le temps en fonction des besoins des clients, des nouvelles technologies, mais aussi des législations suite à des problèmes de pollution. Le concept de « downsizing », qui consiste à réduire le poids du véhicule (donc la taille du moteur) tout en conservant les puissances motrices, entraîne certes une baisse de la consommation de carburant mais induit des contraintes beaucoup plus importantes sur les matériaux et les éléments du moteur. Il conduit :

- D'une part à des conditions extrêmes de marche des moteurs : température et pression de la chambre de combustion, température du carter et des parois des cylindres très élevées,
- Et d'autre part à l'usure et à la corrosion précoce du moteur.

**b. \_ Les mécanismes de dégradation d'une huile moteur**

- Les conditions d'excès d'air nécessaire à la combustion Diesel, et le manque d'étanchéité complète des segments de pistons, font que dans le carter d'huile, l'environnement est assez oxydant. En effet, le gaz de blow-by qui circule de la chambre de combustion au carter d'huile, a une composition qui varie avec le cycle moteur. A l'admission et lors de la phase de compression, le gaz de blow-by avec une composition proche de celle de l'air contient environ 20% d'oxygène, tandis que lors de la combustion et de la détente, sa composition se rapproche plutôt de celle du gaz d'échappement avec environ 4% d'oxygène. Par conséquent, l'huile présente dans le carter est soumise à des conditions d'oxydation.

- La technologie EGR (recirculation des gaz d'échappement) développée pour les moteurs Diesel a pour but de respecter les normes environnementales relatives aux émissions d'oxydes d'azotes (NO<sub>x</sub>). Si cette technologie est efficace pour la limitation des émissions des NO<sub>x</sub> [22], elle conduit cependant à la formation d'une quantité plus importante de particules de suies [23 ;24]. Une partie de ces suies est recirculée dans la chambre de combustion grâce à l'EGR. Ces particules peuvent se déposer sur les parois des cylindres ou être conduites dans le carter d'huile par le gaz blow-by [25]. Les suies présentes sur les parois sont raclées et conduites dans le carter d'huile par les segments [26]. Les suies présentes dans le lubrifiant s'agglomèrent, et provoquent une augmentation de la viscosité du lubrifiant. Plusieurs études ont montré qu'une trop grande quantité de suies dans le lubrifiant accélère sa dégradation et entraîne l'usure des parties métalliques du moteur [27 ; 28]. La technologie EGR conduit à une plus grande quantité de suies qui diminuent l'efficacité du lubrifiant, et provoquent l'usure du moteur. Ainsi la durée d'utilisation du lubrifiant diminue.

### **I.3. Généralités sur la rhéologie**

#### **I.3.1. Mouvements laminaires et contraintes de cisaillement**

##### **a. Mouvements laminaires de cisaillement**

Un matériau soumis à un ensemble de forces est susceptible de se déformer. Les mouvements des différents points du matériau dépendent de la répartition et de l'intensité des forces appliquées.

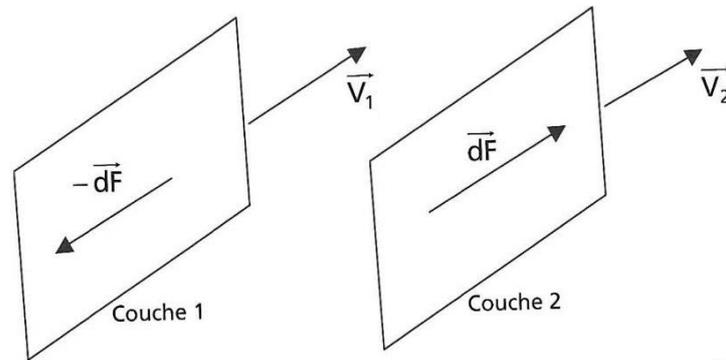
Pour certaines distributions de ces forces, un mouvement appelé mouvement laminaire de cisaillement est engendré.

Un mouvement laminaire de cisaillement est un mouvement au cours duquel le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes, d'épaisseurs infiniment minces ; la déformation du matériau s'effectue par un glissement relatif des différentes couches les unes sur les autres, sans qu'il y ait de transfert de matière d'une couche à l'autre ; c'est un mouvement strictement ordonné et stratifié qui se produit sans brassage du matériau et sans variation de son volume.

##### **b. Contraintes de cisaillement**

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées de mouvement relatif les unes par rapport aux autres : deux couches successives, au contact l'une de l'autre, se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il en résulte l'apparition de forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche : ces forces tangentielles sont appelées forces de cisaillement.

Considérons deux éléments de surface infinitésimaux appartenant aux deux couches consécutives (1) et (2) de vitesses parallèles  $\vec{v}_1$  et  $\vec{v}_2$  comme le montre la figure (I-2).



**Fig.I.2.** Forces de frottement s'exerçant sur deux couches adjacentes lors d'un cisaillement [29 ;30]

Si l'on suppose, en norme, que  $|\vec{v}_1| > |\vec{v}_2|$  il est clair que la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement  $\vec{dF}$  parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). Réciproquement, la couche (2) exerce sur la couche (1) une force de cisaillement  $-\vec{dF}$  tendant à la freiner.

Il est commode de rapporter ces forces de cisaillement à l'unité de surface sur laquelle elles s'exercent ; on définit ainsi ce qu'on appelle la contrainte de cisaillement  $r$  :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (\text{I.3})$$

où  $dF$  représente la projection algébrique de  $\vec{dF}$  sur un axe orienté parallèlement au mouvement.

$r$  étant une force par unité de surface, elle s'exprime en pascals ou en  $\text{N/m}^2$  dans le système international SI.

### I.3.2. Déformation et vitesse de cisaillement

D'une façon générale, en mécanique, on distingue parmi les grandeurs physiques :

- Les grandeurs physiques dynamiques : force, couple..., qui donnent naissance au mouvement ;

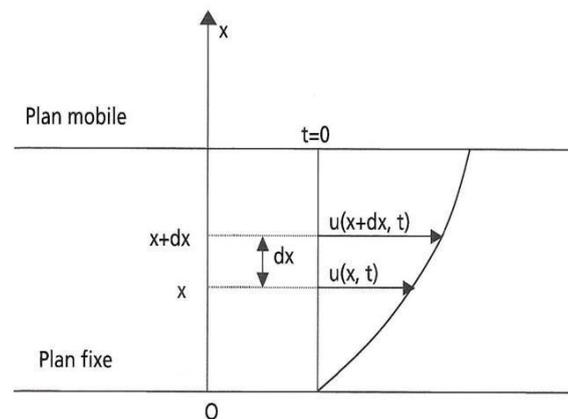
- Les grandeurs physiques cinématiques : vitesse, accélération..., qui décrivent géométriquement le mouvement.

La grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie est la contrainte de cisaillement  $\tau$ , responsable du mouvement laminaire de cisaillement.

Les deux grandeurs cinématiques fondamentales sont la déformation et la vitesse de cisaillement, ces grandeurs décrivant le mouvement du matériau dans l'espace, au cours du temps, indépendamment des contraintes qui lui ont donné naissance.

### a. Déformation de cisaillement $\gamma$

Pour définir la déformation de cisaillement, il est souhaitable d'envisager le cas particulier d'un mouvement laminaire de cisaillement présentant la symétrie plane. C'est le cas où le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile et l'autre fixe comme le montre la figure (I-3).



**Fig. I-3.** Gradient de déplacement dans un mouvement de cisaillement plan [29 ;30].

Considérons les particules de matière qui se trouvent au temps origine (arbitrairement choisi)  $t=0$  dans une certaine section droite. A un instant  $t$  postérieur, chaque particule de matière aura parcouru la distance  $u(x,t)$  où  $x$ , distance séparant la particule de matière du plan solide inférieur, permet de repérer les différentes couches planes du matériau.

On définit la déformation de cisaillement dans le cas de la symétrie plane par la relation :

$$y(x, t) = \frac{du(x, t)}{dx} \quad (\text{I.4})$$

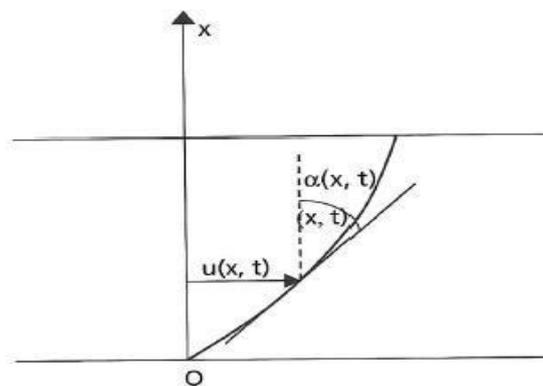
On constate que cette grandeur ne dépend pas du déplacement  $u(x, t)$  lui-même, mais de la variation de ce déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une couche infiniment voisine : c'est en effet cette variation qui caractérise un mouvement de cisaillement pour lequel les différentes couches ont des déplacements relatifs les uns par rapport aux autres.

La déformation de cisaillement ainsi définie est susceptible d'une interprétation géométrique simple ; il est clair en effet que :

$$y(x, t) = \tan \alpha(x, t) \quad (\text{I.5})$$

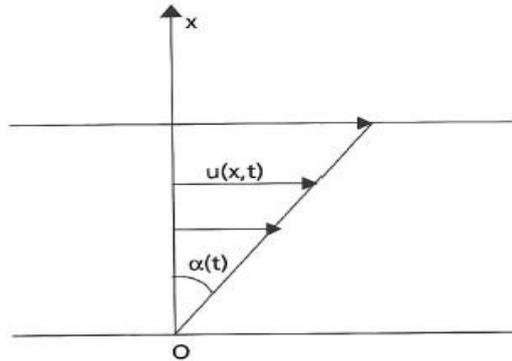
où  $\alpha(x, t)$  représente l'angle que fait la tangente en  $x$  à la courbe joignant les extrémités des vecteurs de déplacement  $u(x, t)$  et l'axe des  $x$  comme le montre la figure (I-4).

En général  $y(x, t)$  dépend non seulement du temps  $t$  mais encore de  $x$ , c'est-à-dire de la couche considérée.



**Fig. I.4.** Interprétation géométrique de  $\gamma$

Il existe un cas particulier important : lorsque la courbe joignant les extrémités des vecteurs de déplacement  $u(x, t)$  est un segment de droite comme le montre la figure (I-5).



**Fig.I.5.** Interprétation géométrique de  $\gamma$  dans un cas particulier.

Alors  $\gamma = \tan \alpha$  où  $\alpha$  représente l'angle que forment ce segment de droite et l'axe des  $x$  ;  $\gamma$  ne dépend plus de la couche considérée mais seulement du temps.

Si, en outre, les déplacements,  $u(x,t)$  demeurent petits, on pourra écrire :

$$\gamma(x, t) = \alpha(t) \quad (\text{I.6})$$

$\varepsilon$  : est une grandeur *sans dimension*.

### b. Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$

Par définition, la vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$  est la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement  $\gamma$  c'est une vitesse de déformation :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (\text{I.7})$$

«  $\dot{\gamma}$  » a les dimensions de l'inverse d'un temps et s'exprime en  $s^{-1}$ . Si l'on se ramène au cas de la symétrie plane, il vient, en utilisant la relation :

$$\dot{\gamma} = \frac{d}{dt} \frac{du}{dx} = \frac{d}{dx} \frac{du}{dt}$$

Et, puisque  $[du(x,t)/dt]$  représente la vitesse  $v(x,t)$  de la couche  $x$  à l'instant  $t$ , on peut encore écrire dans le cas de la symétrie plane :

$$\dot{\gamma} = \frac{dv(x, t)}{dx} \quad (\text{I.8})$$

La vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$  est souvent appelée gradient de vitesse.

Remarque : il faut souligner que les relations (I.4) et (I.8) de  $\gamma$  et  $\dot{\gamma}$  ne s'appliquent pas au cas général et ne sont valables en toute rigueur que dans le cas de la symétrie plane.

Notons cependant que les relations (I.4) et (I.8) pourront souvent être utilisées et fournissent une très bonne approximation dans un grand nombre de cas particulier ne présentant pas la symétrie plane.

### I.3.3. Équation rhéologique d'état, rhéogrammes

#### a. Équation rhéologique d'état

Tout système mécanique obéit à une équation fondamentale qui établit une relation entre les grandeurs dynamiques responsables du mouvement et les grandeurs cinématiques décrivant ce mouvement (exemple de la loi fondamentale de la dynamique du point matériel  $\vec{F} = m \vec{\gamma}$ ).

Il en est ainsi en rhéologie, où existe une relation entre la déformation de cisaillement  $\gamma$  et la contrainte de cisaillement  $r$ , relation qui dépend des propriétés et de la nature du matériau. Nous noterons cette relation :

$$\gamma = f(r) \quad (\text{I.9})$$

C'est l'équation rhéologique d'état de la substance. Sa connaissance détermine toutes les propriétés rhéologiques du matériau. C'est pourquoi le but de la rhéologie est la détermination expérimentale (à l'aide de rhéomètres) de l'équation (I.9).

Remarques : l'équation rhéologique ne dépend pas seulement de la nature et des propriétés du matériau ; elle dépend aussi de la température  $T$  et de la pression  $P$  extérieures. Il serait donc plus correct d'écrire :

$$y = f(r, P, T)$$

Il est naturel que  $y$  à l'instant  $t$  dépende de la contrainte  $r$  au même instant. Il peut paraître plus surprenant que  $y(t)$  dépende également des contraintes qui ont été appliquées au matériau antérieurement à  $t$ . c'est pourtant le cas pour un très grand nombre de substances qu'on dit douées de mémoire. Ces substances se souviennent en effet des sollicitations auxquelles elles ont été soumises dans le passé.

### b. Rhéogrammes

Les courbes qui traduisent graphiquement l'équation rhéologique d'état sont appelées rhéogrammes. Les rhéogrammes les plus fréquemment utilisées et dont nous donnerons des exemples dans les chapitres suivants sont :

- Les graphes  $r, y$  à pression et température extérieures constantes
- Les graphes  $r, \dot{\gamma}$  à pression et température extérieures constantes ;
- Les graphes  $y, t$  traduisant l'évolution de  $y$  au cours du temps, à pression et température extérieures constantes, lorsque la contrainte est appliquée à l'instant initial  $t = 0$  et maintenue constante (expérience de fluage) ;
- Les graphes  $r, t$  traduisant l'évolution de  $r$  au cours du temps, à pression et température extérieures constantes, lorsqu'une déformation est imposée à l'instant initial  $t = 0$  et maintenue constante (expérience de relaxation).

### I.3.4. Viscosités

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

#### a. Viscosité dynamique

Elle est définie par la relation :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{I.10})$$

Et est également appelée viscosité apparente. L'équation dimensionnelle de  $\mu$  est :

$$[\mu] = ML^{-1} T^{-1}$$

Son unité est le pascal seconde (Pa.s) dans le système international SI. Notons que pendant longtemps, l'unité SI a été appelée le Poiseuille et notée Pl.

$$1Pa.s = 1 Pl$$

«  $\mu$  » est une fonction de la température T et de la pression P extérieures, mais aussi en général de la contrainte de cisaillement  $\tau$  ou, encore, selon un point de vue tout à fait équivalent, de la vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$  :

$$\mu = F [T, P, \tau] \tag{I.11}$$

$$\mu = G [T, P, \dot{\gamma}]$$

Si l'on se reporte au rhéogramme  $\tau, \dot{\gamma}$  de la substance (Figure I-6), on observe que pour une valeur de  $\tau$  donnée (ou de  $\dot{\gamma}$ ),  $\mu$  est égal à la pente de la droite joignant l'origine au point représentatif considéré.

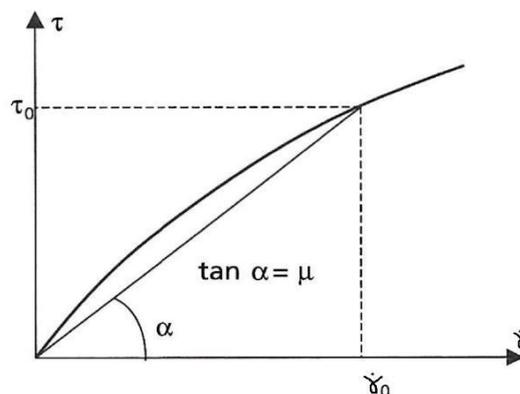
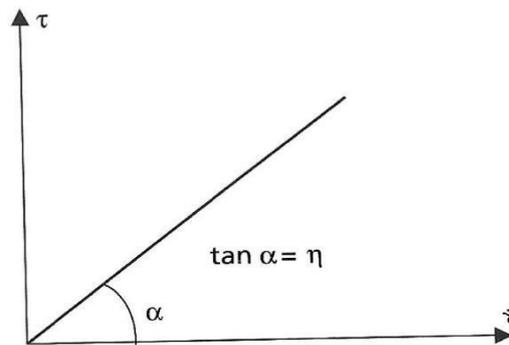


Fig. I.6. Exemple de rhéogramme

Il existe certaines substances pour lesquelles  $\mu$  ne dépend pas de la contrainte de cisaillement : ces corps sont appelés newtoniens. Leur coefficient de viscosité dynamique est alors appelé viscosité absolue et noté  $\eta$ . L'équation rhéologique d'un corps newtonien (équation de Newton) s'écrit donc :

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

Où  $\eta$  n'est fonction que de la température et de la pression extérieures. Le rhéogramme, représentatif de l'équation de Newton est une droite de pente  $\eta$  comme le montre la figure (I-7).



**Fig. I.7.** Rhéogramme Newtonien.

### b. Viscosité cinématique

Ce coefficient est défini par la relation :

$$u = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{1.13})$$

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

La dimension de  $u$  étant  $L^2T^{-1}$ , son unité est le  $m^2 \cdot s^{-1}$  dans le système international.

### c. Viscosités relative, spécifique, intrinsèque

Dans l'étude des solutions (des dispersions), afin de déterminer les influences respectives du soluté (de la phase dispersée) et du solvant (de la phase dispersante) dans le comportement rhéologique, on utilise fréquemment les coefficients de viscosité suivants :

- Viscosité relative

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_s} \quad (\text{I.14})$$

- Viscosité spécifique

$$\mu_{sp} = \frac{\mu - \mu_s}{\mu_s} = \mu_{rel} - 1 \quad (\text{I.15})$$

- Viscosité intrinsèque

$$[\mu] = \limite \left( \frac{\mu_{sp}}{c} \right) \quad (\text{I.16})$$

$$c, \dot{\gamma} \rightarrow 0$$

Où  $\mu$  et  $\mu_s$  représentent respectivement la viscosité dynamique de la solution (de la dispersion) et du solvant (de la phase dispersante), et où  $c$  représente la concentration de la solution (de la phase dispersée).

$\mu_{rel}$  et  $\mu_{sp}$  sont des grandeurs sans dimension.

$[\mu]$  est homogène, à l'inverse d'une concentration.

### I.3.5. Limites du régime laminaire – Nombre de Reynolds

Considérons un mouvement laminaire de cisaillement et augmentons progressivement la vitesse relative d'écoulement des couches les unes par rapport aux autres. On observe qu'à partir d'un certain seuil, le régime laminaire disparaît : les différentes couches se rejoignent, se mélangent, pour finir par se disperser. On a atteint ce qu'on appelle le *régime turbulent*.

La limite entre régime laminaire et régime turbulent est caractérisée, dans chaque situation expérimentale particulière, par la valeur  $Re_0$  que prend un nombre  $R$  appelé nombre de Reynolds, et défini de la façon suivante :

$$Re = \frac{\bar{V}}{\nu} \quad (\text{I.17})$$

Où

- $\bar{V}$ : est la vitesse moyenne d'écoulement ;

- $P$ : est une longueur caractéristique du rhéomètre (par exemple, dans le cas des rhéomètres de type Couette,  $P$  représente la distance séparant les deux surfaces solides) ;
- $\nu$  : est la viscosité cinématique du matériau

Ce nombre de Reynolds,  $Re$ , présente la propriété d'être sans dimension.

Dans chaque cas particulier rencontré, la limite entre régime turbulent et régime laminaire sera définie par une certaine valeur de  $R$  (qui peut être égale à 10, 1000, 100 000 ou toute autre valeur selon les cas), telle que :

- Si  $Re > Re_0$  le régime est turbulent ;
- Si  $Re < Re_0$  le régime est laminaire.

Connaissant la valeur de  $Re_0$ , il est facile de déterminer la vitesse moyenne d'écoulement limite  $\bar{V}_{\text{limite}}$  afin de rester toujours en régime laminaire :

$$\bar{V} = \frac{Re_0 \nu}{P} \quad (\text{I.18})$$



---

# Chapitre II

Modélisation et réseaux de neurones

---



### Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la modélisation par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels pour la prédiction des caractéristiques de l'huile lubrifiante usagée. Nous exposons en outre l'état de l'art des réseaux de neurones et leurs applications dans la prédiction des caractéristiques de l'huile lubrifiante usagée. En premier lieu, nous rappelons la définition et les propriétés des réseaux de neurones, avant de décrire les architectures neuronales les plus utilisées, le choix des entrées et sorties, l'élaboration de la base de données, de la structure du réseau et l'algorithme d'apprentissage.

### II.1 MATLAB

C'est un langage de développement informatique particulièrement dédié aux applications scientifiques et utilisé pour développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul et des simulations complexes du système de contrôle.

Ce software est développé par la société MathWorks. Il permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes et de créer des interfaces utilisateurs comme le montre la figure (II.1). Il peut aussi s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran.

Le logiciel Matlab peut s'utiliser tout seul ou avec des boîtes à outils (généralement connues sous le nom de toolbox) et à chaque domaine est associé une ou plusieurs boîtes à outils spécifiques, par exemple dans le domaine des Mathématiques, Statistiques, et de l'Optimisation nous trouvons la « Partial Differential Equation Toolbox » (boîte à outils pour la résolution des équations différentielles), ou la « Curve Fitting Toolbox » (boîte à outils pour l'ajustement des courbes), ou encore la « Neural Network Toolbox » (boîte à outils pour l'utilisation des réseaux de neurones).

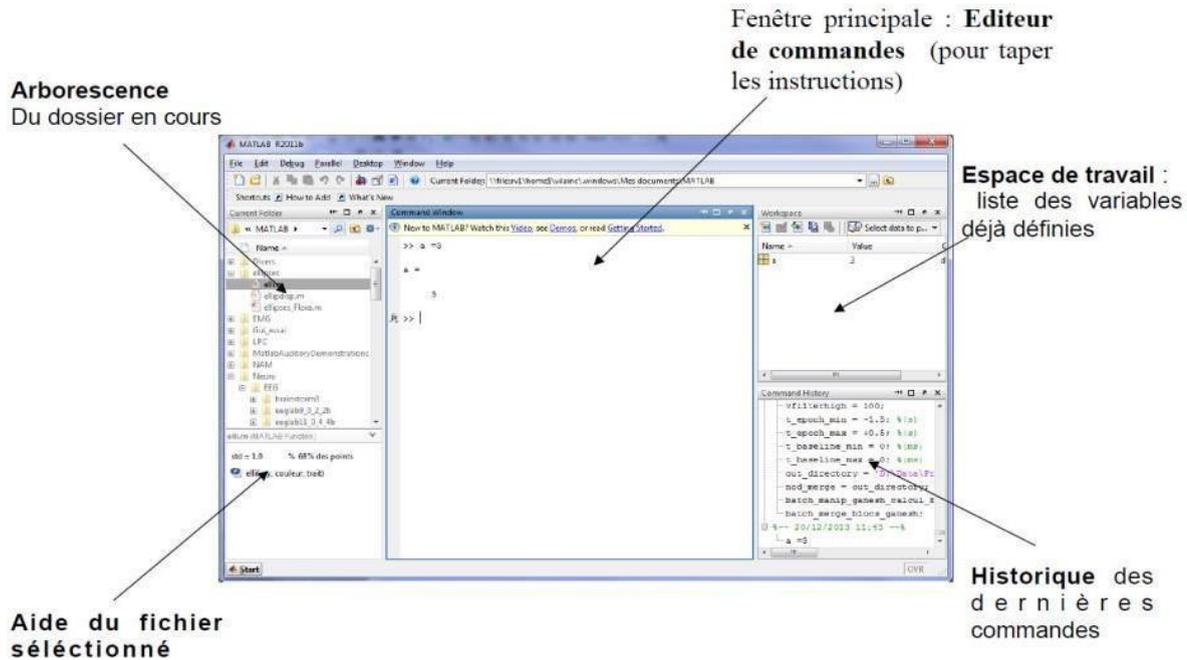


Fig. II.1 : Interface du software Matlab

## II.2 L'INTERFACE PRINCIPALE

Au lancement de Matlab, une interface apparait comme le montre la figure (II.2). Le bouton nouveau projet sert à ouvrir une nouvelle fenêtre de « Command Window ». Le logiciel propose un véritable environnement de travail composé de multiples fenêtres. Nous pouvons distinguer quatre blocs :

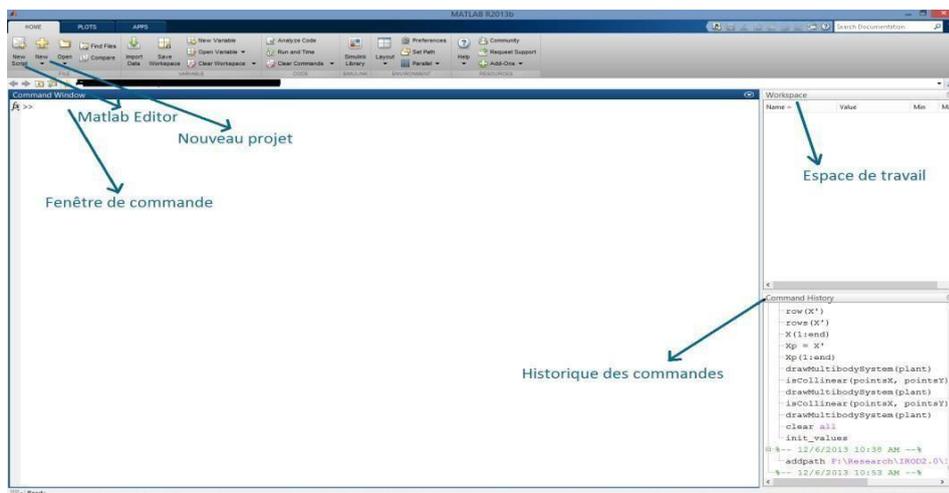


Fig. II.2: Interface Matlab principale.

**Fenêtre de commande (Command Window)** : C'est là que sont saisîtes toutes les instructions de notre programme, dans cette zone, les instructions sont écrites et exécutés une après l'autre.

**Editeur (MATLAB Editor)** : Contrairement à Command Window, ici les instructions sont écrites à la fois, une fois fini, le programme exécute les instructions sous la forme d'une fonction.

**Espace de travail (Workspace)** : Dans cette zone, on verra toute les variables et les constantes qu'on utilise actuellement dans le Command Window, leur nom, leur format, leurs tailles, et leurs types y seront aussi affichés.

**Historique des commandes (Command History)** : L'historique des commandes affiche un journal d'états qu'on a exécuté dans les sessions de MATLAB actuelles et/ou précédentes.

### II.3 Implémentation d'un R-D-N dans Matlab

Avant d'aller plus loin, nous nous devons de préciser que la simulation des Réseaux de neurones dans MATLAB peut se faire de deux principales méthodes. La première étant l'utilisation de la « Neural Network (NN) toolbox » et la seconde se fera étape par étape et ce, en programmant nous-même l'algorithme dont on désire "Implémenter".

Avec la « toolbox » défini précédemment, nous n'avons plus besoin de parler d'implémentation, tout est déjà prêt, nous n'avons qu'à introduire nos paramètres et la « toolbox » se charge du reste [31].

### II.4 Réseaux de neurones

Un réseau de neurones artificiels [32][33], ou réseau neuronal artificiel, est un système dont la conception est à l'origine schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques, et qui par la suite s'est rapproché des méthodes statistiques [34].

Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type probabiliste, en particulier bayésien. Ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes [35] permettant de créer des classifications rapides (réseaux de Kohonen en particulier), et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle auxquelles ils fournissent un mécanisme perceptif indépendant des idées propres de l'implémenteur, et des informations d'entrée au raisonnement logique formel.

En modélisation des circuits biologiques, ils permettent de tester quelques hypothèses fonctionnelles issues de la neurophysiologie, ou encore les conséquences de ces hypothèses pour les comparer au réel.

Un réseau neuronal artificiel est un système basé sur le réseau neuronal biologique, il est composé de trois éléments ; dendrites, axone et synapse, comme le montre la figure (II.3).

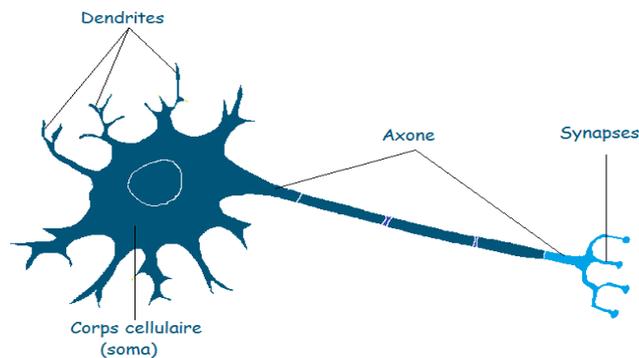


Fig. II.3 Neurone biologique

Les neurones sont connectés entre eux par l'intermédiaire de jonctions appelées synapses, comme le montre la figure (II.3).

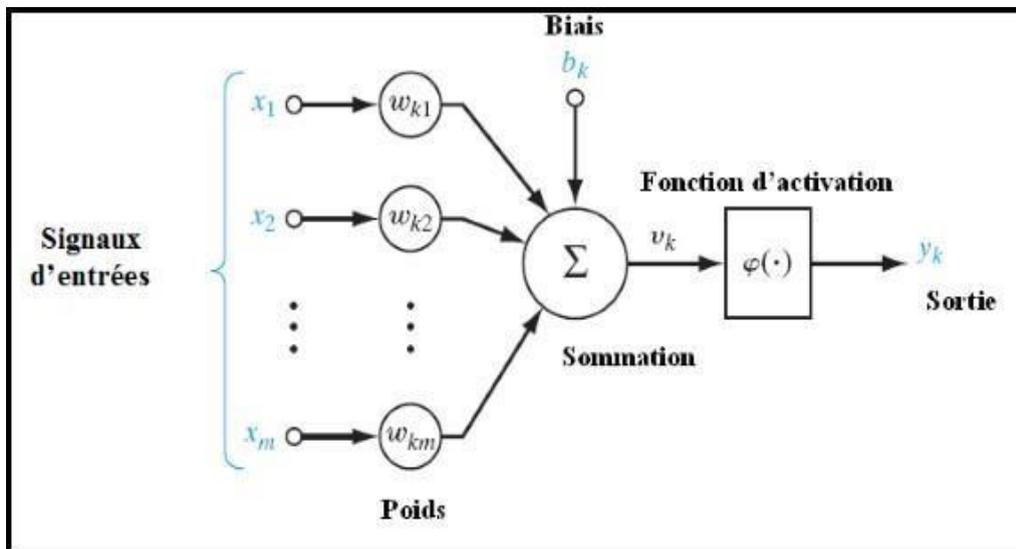


Fig. II.4 Modèle non linéaire d'un neurone

Chaque neurone reçoit des signaux de plusieurs connections recevant en permanence des signaux d'entrée. Si l'addition de ces signaux dépasse un certain seuil une réponse est envoyée à travers l'axone. Il est commode de représenter graphiquement un neurone non linéaire comme indiqué sur la figure (III.4). Le modèle neuronal comprend aussi un biais, noté ( $b_k$ ). Le biais ( $b_k$ ) a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'entrée nette de la fonction d'activation, selon qu'elle est positive ou négative. En mathématiques, on peut décrire le modèle neurone par l'équation suivante :

$$v_k = \sum_{i=1}^m w_{ik} x_i + b_k \quad (\text{II.1})$$

La sortie de neurone a pour expression :

$$y_k = f(v_k) \quad (\text{II.2})$$

Où :

$x_1, x_2, \dots, x_m$  : sont les signaux d'entrée;

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$  : sont les poids synaptiques respectifs du neurone k;

$v_k$  : est la sortie du combineur linéaire due aux signaux d'entrée;

$b_k$  : est le biais;

$f(v_k)$  : est la fonction d'activation;

$y_k$  : est le signal de sortie du neurone.

La fonction ( $\varphi$ ) est appelée fonction d'activation elle peut être une fonction à seuil, une fonction linéaire ou non linéaire. La fonction sigmoïde se présente comme une approximation continûment dérivable de la fonction d'activation linéaire par morceaux ou de la fonction seuil. Elle présente l'avantage d'être régulière, monotone, continûment dérivable.

## II.5 Architecture des réseaux de neurones

Un réseau de neurones est composé d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie dite à perceptron monocouche ou avec une ou plusieurs couches cachées dites à perceptron multicouche. Le perceptron multicouche figure (II.5), est le plus connu des réseaux de neurones et le plus utilisé pour des problèmes d'approximation et de prédiction.

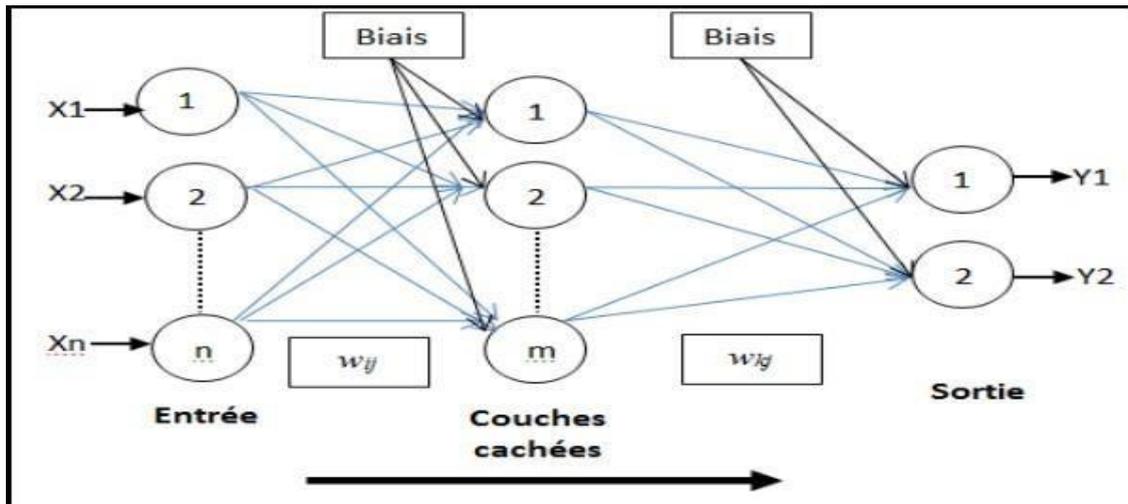


Fig. II.5 Structure d'un perceptron multicouches

## II.6 Domaines d'applications

Cette dernière décennie a vu l'intégration de plusieurs branches de différents secteurs dans le monde de l'informatique notamment les réseaux de neurones [36]; et ce grâce à sa capacité à résoudre pas mal de problèmes, on y trouve: le secteur des finances (prévision de bourse), le secteur des transports (détection des défauts dans les métros), le secteur des sciences et d'ingénierie (pilotage des véhicules autonomes), ou encore le secteur de la médecine (diagnostiquer les maladies et prédire la gravité d'une maladie quelconque).

## II.7 Caractéristiques des Réseaux de Neurones Artificiels

### II.7.1. Présentation

Les réseaux de neurones artificiels sont donc des modèles inspirés du fonctionnement du cerveau humain, dans le but est de concevoir des machines capables de, non d'imiter, mais de se rapprocher au maximum du comportement de l'intelligence dont disposent les êtres humains, d'où la notion de "Intelligence Artificielle".

### II.7.2. Les entrées

Chaque neurone possède plusieurs entrées, on note  $E_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) les entrées du réseau, avec  $n$  : nombre de neurones d'entrées ; et à chacune d'entre elle on affecte un poids  $\omega_i$ , on y ajoute un coefficient dit "biais"  $\omega_0$  supposé lié à une entrée  $E_0 = 1$ , la  $i^{\text{ème}}$  information qui parviendra au

neurone est le produit  $\omega_i \times E_i$

Le neurone calculera la somme :  $\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x$ , celle-ci sera le potentiel du neurone, la sortie sera générée par une fonction d'activation, qui sera très importante car elle déterminera par la suite le fonctionnement du réseau.

### II.7.3. Les fonctions d'activations

La fonction d'activation, ou fonction de transfert, est une fonction qui doit renvoyer un réel proche de 1 quand les bonnes informations d'entrée sont données et un réel proche de 0 quand elles sont mauvaises. On utilise généralement des fonctions à valeurs dans l'intervalle réel  $[0 ; 1]$ . Quand le réel est proche de 1, on dit que l'unité (le neurone) est active alors que quand le réel est proche de 0, on dit que l'unité est inactive [37]. Elle peut prendre de nombreuses formes : binaire, linéaire, sigmoïde, et bien d'autres encore.

### II.7.4. Évaluation du modèle neuronal

L'étape importante dans l'estimation des modèles neuronaux est de choisir l'ordre du modèle. Une fonction sigmoïde tangente a été appliquée à la couche cachée, et une fonction de transfert linéaire a été utilisée dans la couche de sortie. Le nombre de neurones de la couche cachée a été sélectionné par plusieurs essais pour estimer le modèle. La performance du modèle a été évaluée par l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de détermination (R) :

$$MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n (y_p - y_d)^2 \tag{III.3}$$

Et

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_i^n (y_p - y_d)^2}{\sum_i^n (y_p)^2} \right) \tag{III.4}$$

Avec :

- n: est le nombre des données,
- $y_k$ : sont les sorties de réseau,
- $y_d$ : sont les données désirées.

## II.8. Algorithme d'apprentissage

L'apprentissage c'est l'étape fondamentale des réseaux de neurones. Les règles d'apprentissage sont des algorithmes pour trouver des poids appropriés ( $w$ ) et / ou d'autres paramètres de réseau. L'apprentissage d'un réseau neuronal peut être considéré comme un problème d'optimisation non linéaire pour trouver un ensemble de paramètres de réseau. Ce type

d'estimation de paramètres est également appelé algorithme d'apprentissage. En général, les réseaux de neurones se réalisent en modifiant les connexions entre les neurones par époque. Une époque est une exécution complète lorsque tous les exemples de formation sont présentés au réseau et sont traités en utilisant l'algorithme d'apprentissage qu'une seule fois. Après l'apprentissage, un réseau de neurones représente une relation complexe et a la capacité de généralisation. L'apprentissage supervisé ajuste les paramètres du réseau par une comparaison directe entre la sortie réelle du réseau et la sortie générée, figure (II.6). L'apprentissage supervisé est un système de rétroaction en boucle fermée, où l'erreur est le signal de retour. La mesure d'erreur, qui montre la différence entre la sortie du réseau et la sortie des échantillons de formation, est utilisée pour guider le processus d'apprentissage.

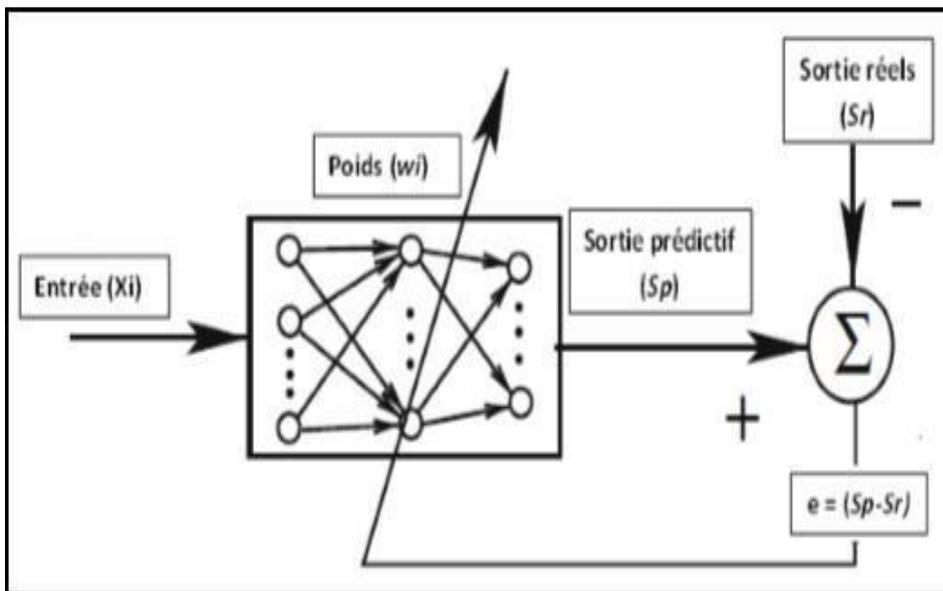


Fig. II.6 Apprentissage supervisé

La mesure de l'erreur est généralement définie par l'erreur quadratique moyenne (MSE).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{1}^n \|Sp - Sr\|^2 \tag{II.5}$$

Avec :

**n** : est le nombre de paires dans l'ensemble d'échantillons,

**Sp** : est la partie de sortie prédictive par le réseau

**Sr** : est la sortie de données réelles.

La nouvelle erreur (MSE) est calculée après chaque époque. Le processus d'apprentissage est terminé lorsque (e) est suffisamment petit ou si un critère de défaillance est atteint.



---

# Chapitre III

Étude expérimentale

---



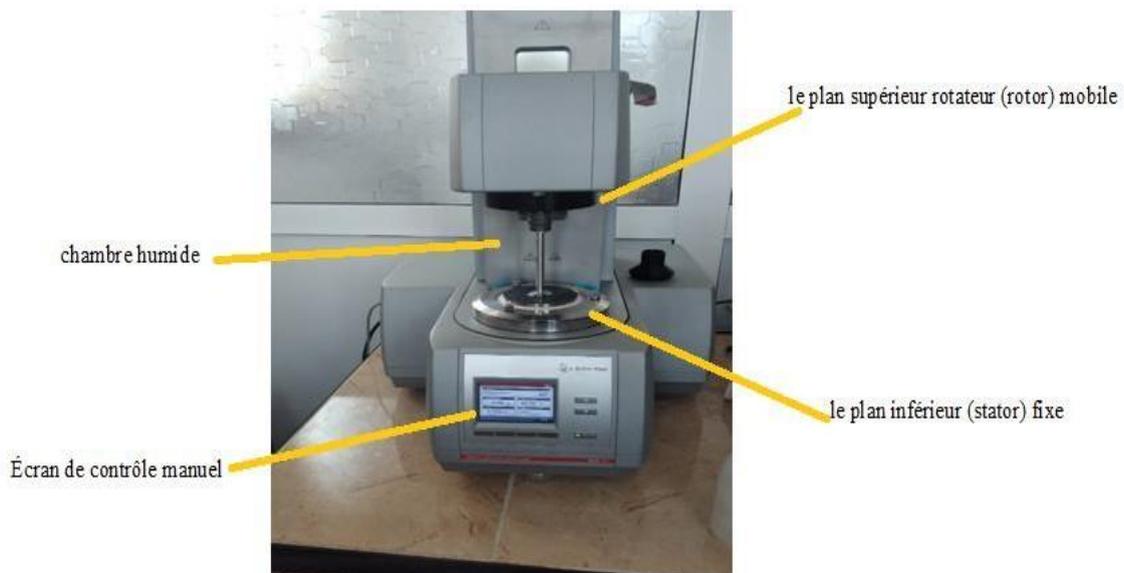
### Introduction

Dans le cadre de notre projet, une campagne de mesures rhéologiques a été réalisée à l'aide d'un rhéomètre MCR 302 au sein du laboratoire de Fluides Industriels, Mesures et Application à l'université Djilali Bounaama de Khemis Miliana. Ces mesures rhéologiques avaient pour objectif d'étudier le comportement rhéologique de l'huile moteur 15W40 de fabrication nationale. Nous avons mesuré la viscosité apparente de l'huile moteur en fonction de plusieurs paramètres tels que : le taux de cisaillement et la température. Ces mesures ont été effectuées dans un intervalle de température de 25°C à 60°C.

### III.1- Le rhéomètre

#### III.1.1- Présentation

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



**Fig. III.1** : Rhéomètre Anton Paar MCR 302



Fig. III.2 : Géométrie cylindres coaxiaux



Fig. III.3 : Géométrie plan-plan

**III.1.2- Le rhéomètre rotatif**

Dans le cas d'un 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) comme le montre la figure (III.4). 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.

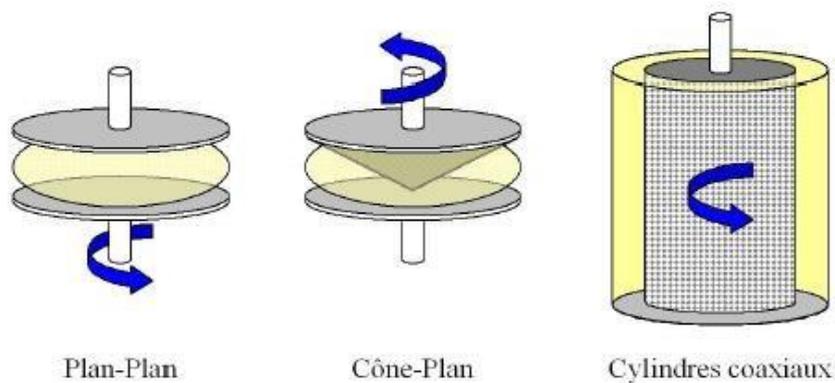


Fig. III.4. : Différentes géométries de rhéomètre

### III.1.3. Principe de mesure

Les rhéomètres rotatifs sont de loin les plus utilisés. Pour ce type de rhéomètre, le produit étudié remplit l'espace entre deux pièces coaxiales (le rotor et le stator). Le rapport entre le couple de rotation  $M(t)$  transmis d'une pièce à l'autre par la substance cisailée, et la vitesse de rotation  $\Omega(t)$  du rotor, donne la viscosité, à une constante géométrique près. L'angle de rotation  $\phi(t)$  peut aussi être mesuré à chaque instant  $t$ . On distingue les appareils à vitesse de rotation imposée (les plus fréquents) et ceux à couple imposé. À la différence du type Couette, le couple est mesuré sur le rotor pour le type Searle.

Certains modèles permettent, en appliquant une sollicitation sinusoïdale (mode oscillation), de déterminer les grandeurs viscoélastiques intrinsèques de la matière, qui dépendent notamment du temps (ou de la vitesse angulaire  $\omega$ ) et de la température. Sont par exemple mesurés :

- la viscosité dynamique,  $\mu$  ou  $\eta$ , en fonction de  $\gamma$  (tracé de la courbe de viscosité), de la température, du temps, etc.
- la contrainte tangentielle  $\tau$  en fonction de  $\gamma$  (courbe d'écoulement)

## III.2 Présentation de la poudre de charbon

Le charbon de bois est un déchet carboné qui résulte du puisage de l'eau des matières végétales en les brûlant dans un endroit sans air, ce qu'on appelle la distillation destructive, ou en chauffant du bois au feu. Quant à sa couleur noire, elle est due à la présence d'un pourcentage élevé de carbone, qui est léger contrairement au charbon naturel. Les caractéristiques de charbons de bois destinés à la sidérurgie par exemple sont données dans le tableau III.1. La figure III.5 montre une photographie de la poudre de charbon que nous avons utilisé dans le cas de notre étude.

Composition physique et chimique du charbon (par rapport au poids sec)	Extrêmes Max	Extrêmes Min	Moyenne annuelle	Charbon de bois considéré comme "bon à excellent"
Carbone	80%	60%	70%	75 - 80 %
Cendres	10%	3%	5%	3 - 4 %
Matières volatiles	26%	15%	25%	20 - 25 %
Densité apparente à la réception (kg/m <sup>3</sup> )	330	200	260	250 - 300
Densité apparente (charbon sec)	270	180	235	230 - 270
Taille moyenne (mm) à la réception	60	10	35	20 - 50
Teneur en poussier (- 6,35 mm) à la réception	22%	10%	15%	10 % max.
Teneur en humidité a la réception	25%	5%	10%	10 % max.

**Tableau III.1** : Caractéristiques de charbons de bois destinés à la sidérurgie [38]



**Fig. III. 5** : Photographie de poudre de charbon

### III.3 Présentation de l'huile SAE 15W40

L'huile CHELIA SUPER TD 15W40 est une huile minérale de type SHPD (SUPER HEIGH Performance Diesel) conçu pour répondre aux demandes de lubrification les plus exigeantes des moteurs diesel et turbo diesel de la dernière génération des camions, tracteurs routiers, véhicules utilitaires et engins de travaux publics. Cette huile convient également pour la lubrification des véhicules légers essence et diesel.

Les caractéristiques de l'huile SAE 15W40 sont énumérées dans le Tableau III.2. La figure III.6 montre une photographie de l'emballage commercial de cette huile.

Essais	Norme	Unité	Valeurs		
			Min	Max	Typique
Densité à 15 °C	D1298		0.85	0.95	0.883
Viscosité à 40 °C	D445	Cst	-	-	102
Viscosité à 100 °C	D445	Cst	12.5	16.3	14.12
Indice de viscosité	D2270		126	-	
Point d'éclair VO	D 92	°C	215	-	
Point d'écoulement	D 97	°C		-27	

Tableau III.2 : Caractéristiques physico-chimiques de l'huile CHELIA 15W40 [39]



Fig. III.6 : Photographie de l'emballage commercial de l'huile CHELIA.

### III.4 Préparation des échantillons

Pour préparer les échantillons d'huile polluée avec de la matière carbonneuse, nous avons procédé de la façon suivante. Pour une fraction de charbon donnée et une masse d'huile neuve donnée nous calculons la masse " $m_p$ " de polluant à ajouter à la masse " $m_h$ " d'huile neuve, en utilisant l'équation (III.2), permettant ainsi de préparer un échantillon. En tout, Huit échantillons ont été préparés avec des fractions massiques en polluant de 0,25%, 0.5% 0.75% ,1% ,1.25% ,1.5% ,1.75% et 2%.

$$f = m_p \times \frac{100}{m_p + m_h} \quad (\text{III.1})$$

$$m_p = f \times \frac{m_h}{(100-f)} \quad (\text{III.2})$$

Les masses de la matière carbonneuse calculées correspondantes à chaque fraction massique sont données dans le tableau III.3.

N° échantillon	F : % en masse de polluant	$m_p$ : masse de polluant en (g)	$m_h$ : masse d'huile neuve en (g) pour moteur Diesel
1	0.25	0.0875	35
2	0.50	0.1750	35
3	0.75	0.2625	35
4	1	0.3500	35
5	1.25	0.4375	35
6	1.50	0.5250	35
7	1.75	0.6125	35
8	2	0.7000	35

**Tableau III.3** Masses et fractions massiques de la matière carbonneuse d'un échantillon.

Une fois la masse du charbon calculée, cette quantité est pesée à l'aide d'une balance de précision (Figure III.7). Cette quantité de charbon est ajoutée à l'huile SAE15W40. Le mélange est

ensuite agité à l'aide d'un agitateur magnétique (Figure III.8) pendant 30 minutes pour obtenir un mélange homogène et uniforme.

Cette manipulation est répétée pour les autres échantillons pour obtenir huit échantillons avec des concentrations de 0.25% ,0.5% 0.75%, 1% ,1.25% ,1.5% ,1.75% et 2% en plus de l'échantillon de l'huile pure (0%) comme le montre la figure (III.9).



**Fig. III.7 :** Balance de précision



**Fig. III.8 :** Agitateur magnétique



**Fig. III.9** : Photographie des différents échantillons préparés

### III.5 Déroulement des essais

L'étape de préparation des échantillons étant réalisée, nous avons entamé la phase des mesures rhéologiques comme le montre la figure (III.10). Les caractérisations rhéologiques en cisaillement sont effectuées à l'aide d'un rhéomètre à contrainte imposée MCR 302 couplé à un logiciel d'analyse permettant d'une part la programmation et l'exécution de divers protocoles de mesures et d'autre part, l'acquisition et le traitement des données. Le logiciel permet en outre une visualisation instantanée des rhéogrammes (enregistrement de la contrainte ( $\tau$ ) en fonction de la vitesse de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ )). Le rhéomètre utilise d'autres accessoires pour fonctionner, comme le compresseur à air qui alimente le palier à air de l'arbre tournant du rhéomètre et le bain de circulation pour réguler la température dans la cellule de mesure.



**Fig. III.10** Photographie du dépôt de l'échantillon à tester



---

# Chapitre IV

Résultats et discussion

---



## Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des essais rhéologiques réalisés à l'aide du rhéomètre MCR 302. Ces résultats sont exploités pour étudier le comportement rhéologique d'une huile neuve de fabrication nationale ainsi que le comportement rhéologique de cette même huile polluée, en fonction de plusieurs paramètres tels que : la température, le gradient de cisaillement et la fraction massique en polluant. L'influence de la température sur le comportement d'écoulement de l'huile fait partie des données les plus importantes pouvant être déterminées à l'aide d'un rhéomètre.

### IV.1 Identification du comportement rhéologique d'un fluide

Pour identifier le comportement rhéologique des échantillons d'huiles polluées de moteur CHELIA 15W40 que nous avons préparé et testé, nous utilisons la relation d'Ostwald-de Waele qui est donnée par l'expression (IV.1) suivante :

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad 0 < n \leq 1 \quad \text{IV.1}$$

Où « n » est l'indice de la loi de puissance, « k » est l'indice de consistance, «  $\tau$  » est la contrainte de cisaillement et «  $\dot{\gamma}$  » la vitesse de cisaillement ou gradient de vitesse.

La viscosité d'un fluide qui suit la loi de puissance est donnée par l'expression (IV) suivante :

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

Dans cette expression, «  $\mu$  » représente la viscosité apparente et «  $\dot{\gamma}$  » est le taux de cisaillement. L'indice « n » détermine le comportement rhéologique des fluides :

Si « n » est égale à « 1 » alors le fluide est newtonien et on obtient le diagramme caractéristique de la figure (IV.1).

Et si sa valeur est différente de « 1 » alors le fluide est non newtonien et on obtient les diagrammes caractéristiques de la figure (IV.2).

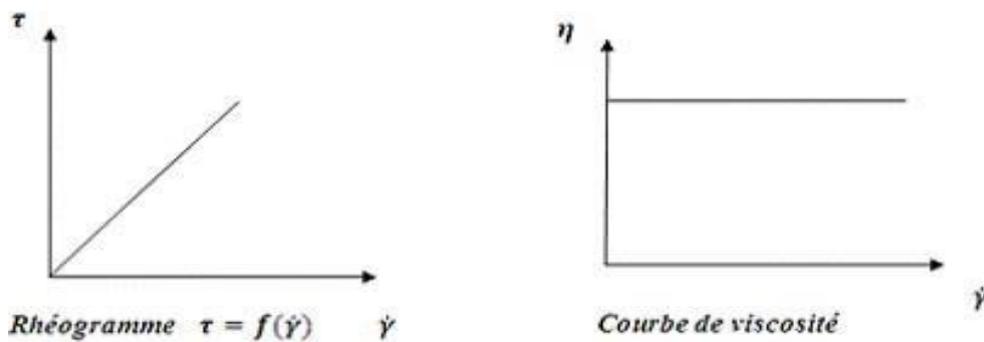


Fig. IV.1: Diagramme caractéristique des fluides newtoniens

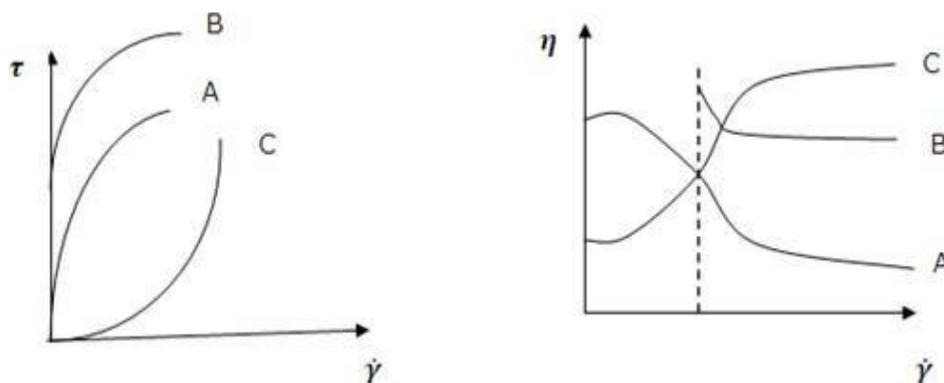


Fig. IV.2: Diagrammes caractéristiques des fluides non- newtoniens

A : Visqueux Rhéofluidifiant    B : Viscoplastique    C : Visqueux Rhéoépaississant

### IV.2 Comportement rhéologique d'une huile neuve CHELIA 15W40

Sur les figures (IV.3) et (IV.4) nous avons représenté les variations de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de cisaillement dans le cas d'une huile neuve CHELIA 15W40.

Nous remarquons sur la figure (IV.3) qu'à partir de la valeur  $10 \text{ s}^{-1}$  du gradient de cisaillement et lorsque la température est constante, toute augmentation du gradient de cisaillement conduit à une diminution linéaire de la viscosité apparente. Nous observons aussi que l'évolution de la viscosité par rapport au gradient de cisaillement est amenée à varier d'une température à l'autre. Comme nous pouvons le voir sur la figure (IV.4), dans l'intervalle de température de  $25 \text{ °C}$  à  $60 \text{ °C}$ , l'huile CHELIA 15W40 a un comportement newtonien.

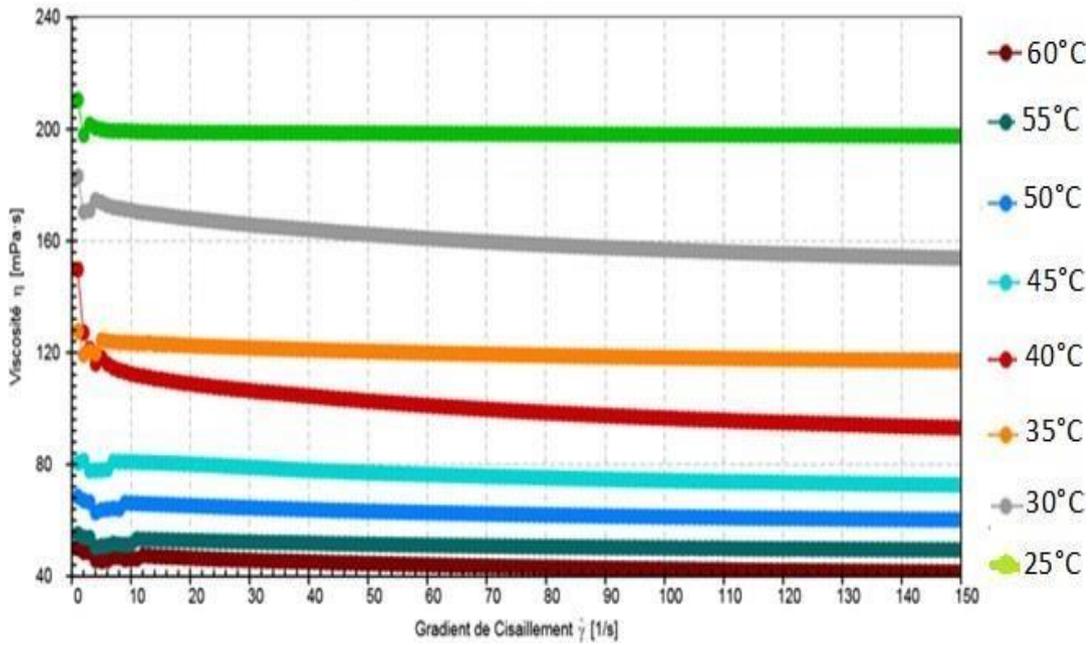


Fig. IV. 3: Variations de la viscosité apparente en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour l'huile CHELIA 15W40.

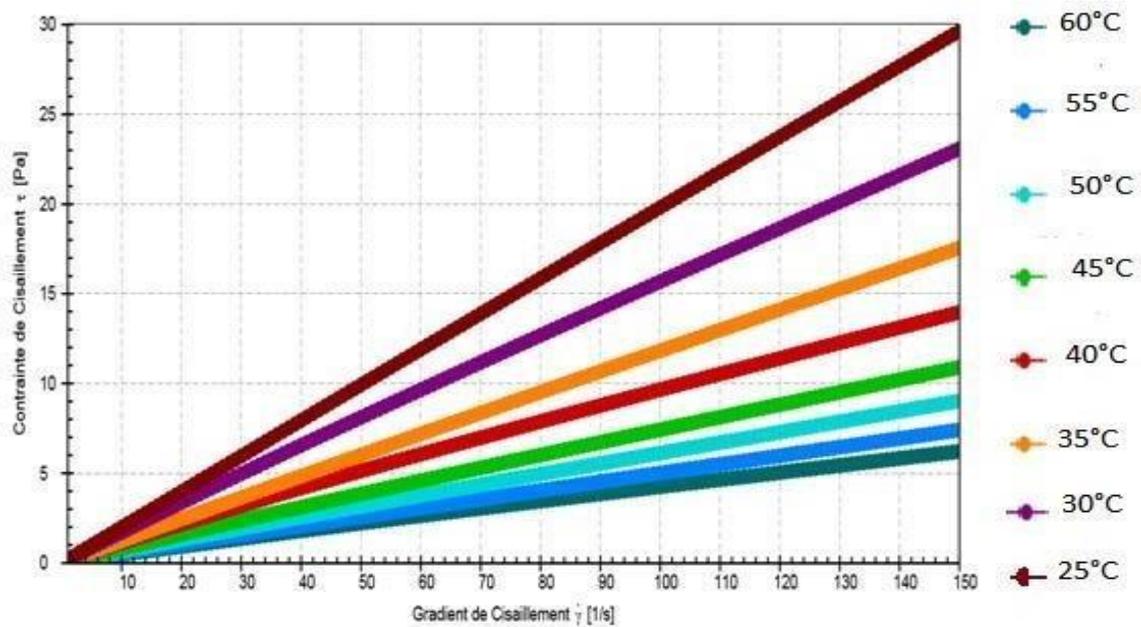
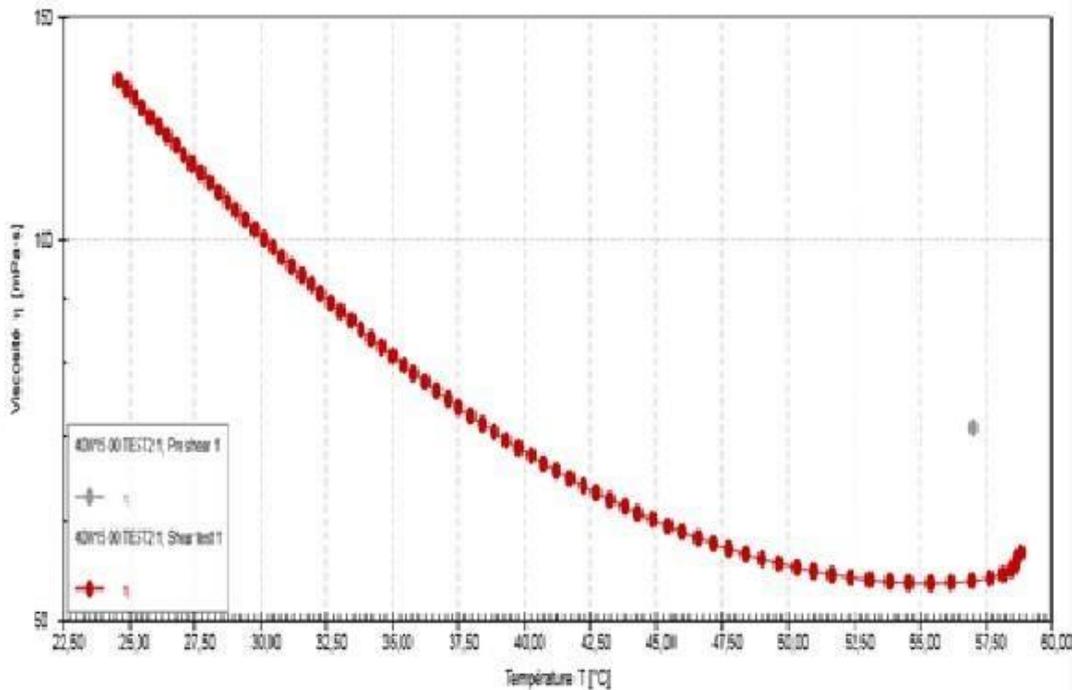


Fig. IV.4: Variations de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour l'huile CHELIA 15W40

Sur la figure (IV.5), nous avons représenté l'évolution de la viscosité en fonction de la température. Nous constatons que la viscosité de l'huile CHELIA 15W40 est forte à la température 25°C et qu'une élévation de la température entraîne une diminution de la viscosité c'est ce qu'on appelle la proportion inverse, où la viscosité est à sa plus faible diminution à une température de 60°C.

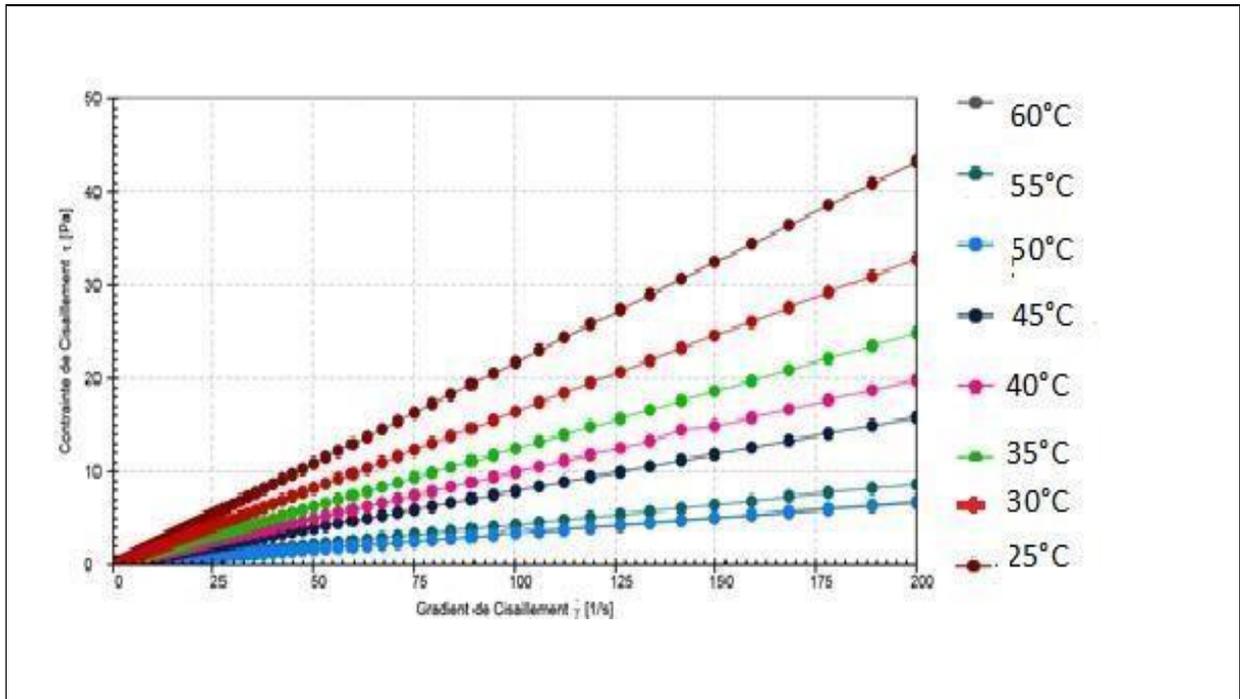


**Fig. IV.5:** Variations de la viscosité apparente en fonction de la température de l'huile CHELIA 15W40.

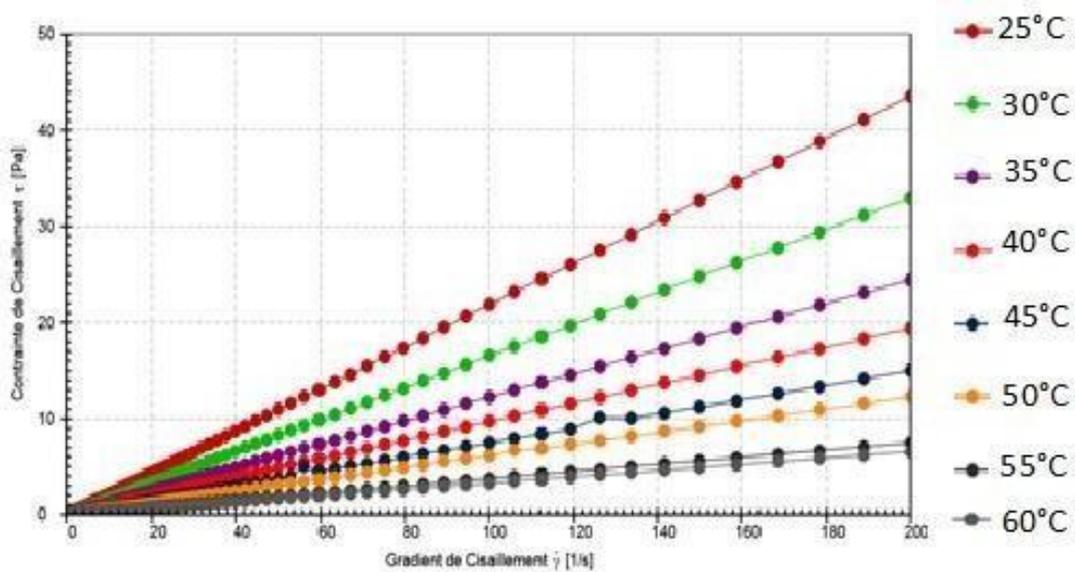
### IV.3 Comportement rhéologique de l'huile CHELIA 15W40 polluée

Sur les figures (IV.6), (IV.7) et (IV.8) sont représentées les variations de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de cisaillement pour une huile CHELIA15W40 polluée avec une fraction massique de charbon de bois. Nous présentons les résultats de trois échantillons sur les huit que nous avons testé, avec les fractions massiques suivantes de 0.25%, 1.25% et 2% respectivement. Nous constatons pour les trois tests que l'huile polluée garde un comportement newtonien et que la contrainte de cisaillement diminue lorsque la fraction de massique de polluant augmente. Nous remarquons que la contrainte de cisaillement varie avec le gradient de cisaillement et la température à laquelle le test a été réalisé, pour les trois concentrations citées

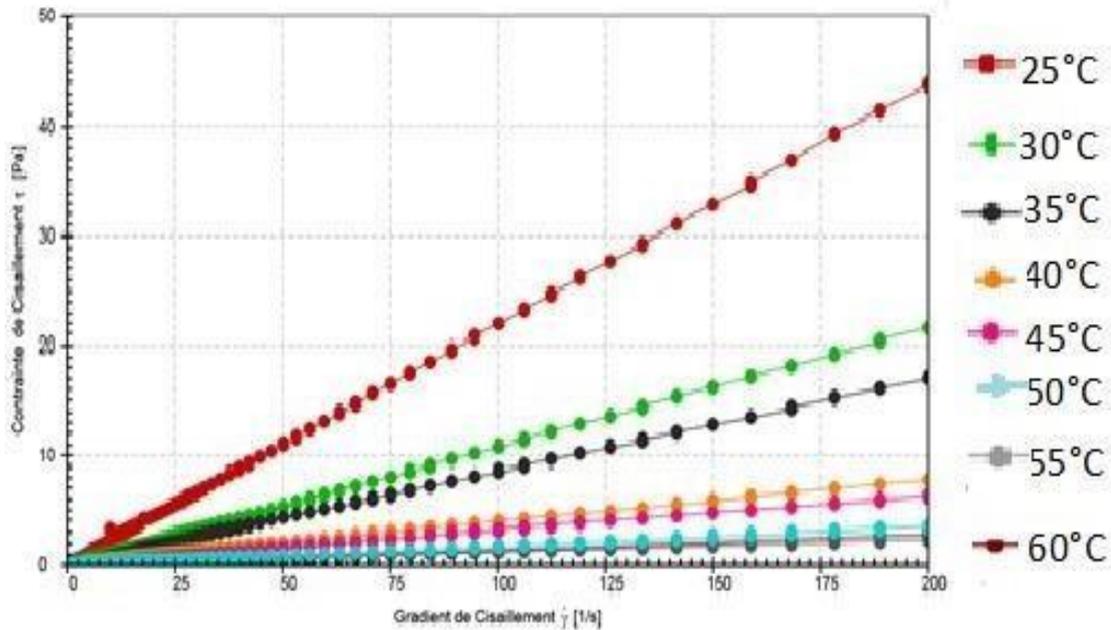
plus haut.



**Fig. IV. 6:** Variations de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 0.25% en polluant.



**Fig. IV. 7:** Variations de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 1.25%



**Fig. IV. 8:** Variations de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 2%

Sur les figures (IV.9), (IV.10) et (IV.11), nous avons représenté les variations de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement pour l'huile polluée 15W40 avec une fraction massique de 0.25%, 1.25% et 2% respectivement. Pour ces trois concentrations, la viscosité varie en fonction du gradient de cisaillement et la température à laquelle le test a été réalisé. Nous remarquons que la viscosité dans tous les cas diminue avec l'augmentation continue de la température. Aussi plus le pourcentage de la quantité de polluant est élevé et plus la viscosité est élevée pour une même de la température de test de l'échantillon.

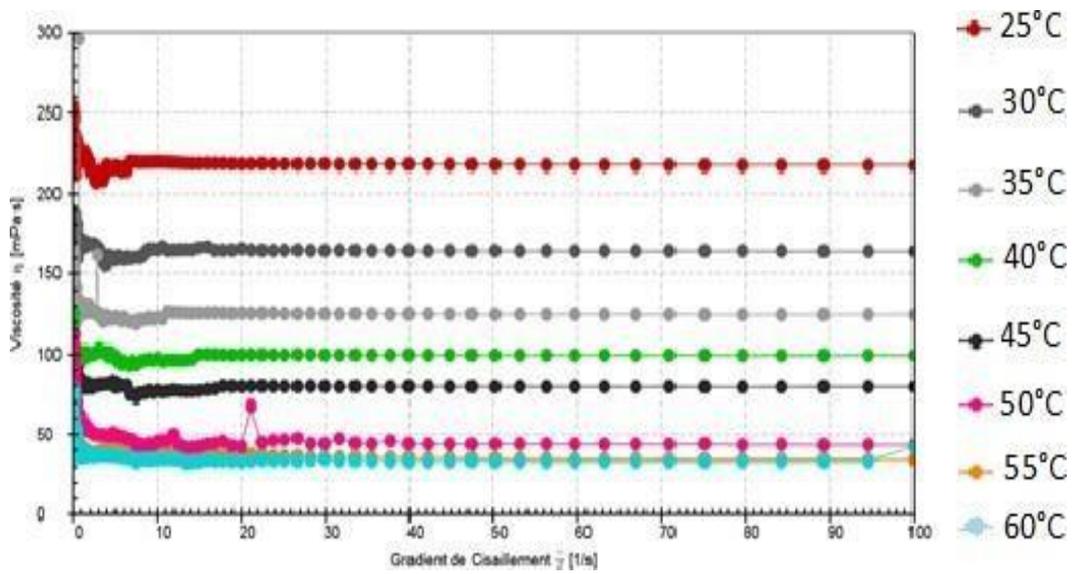


Fig. IV. 9: Variations de la viscosité apparente en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 0.25% en polluant

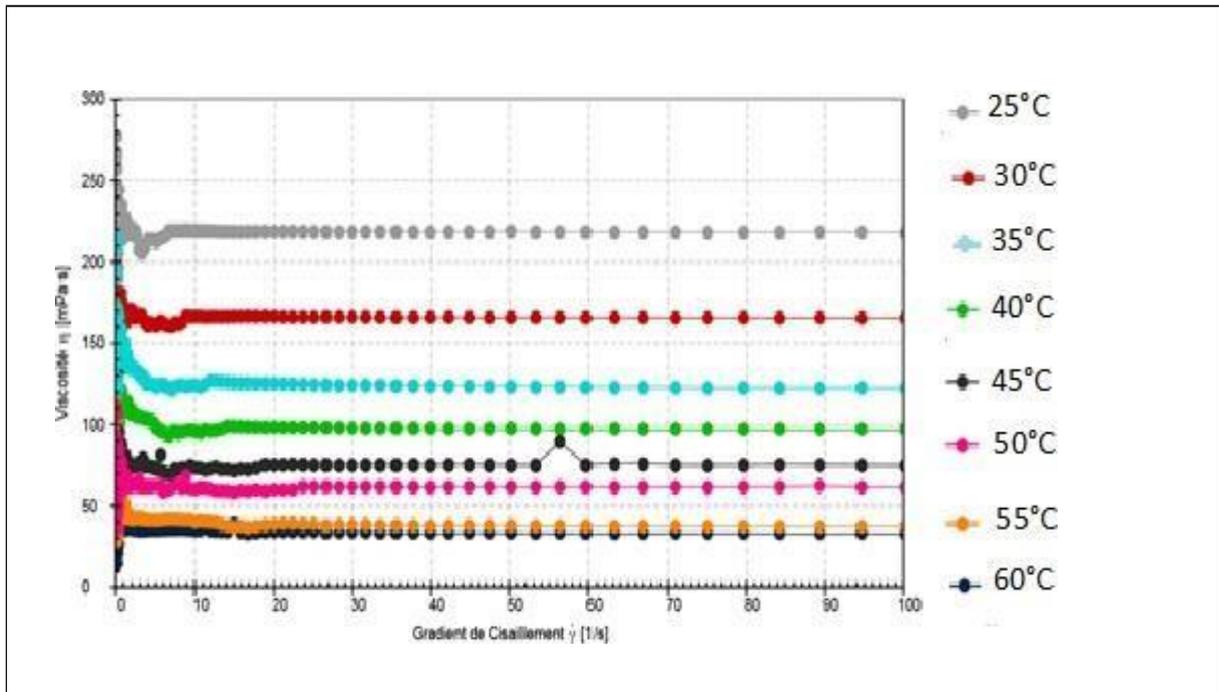
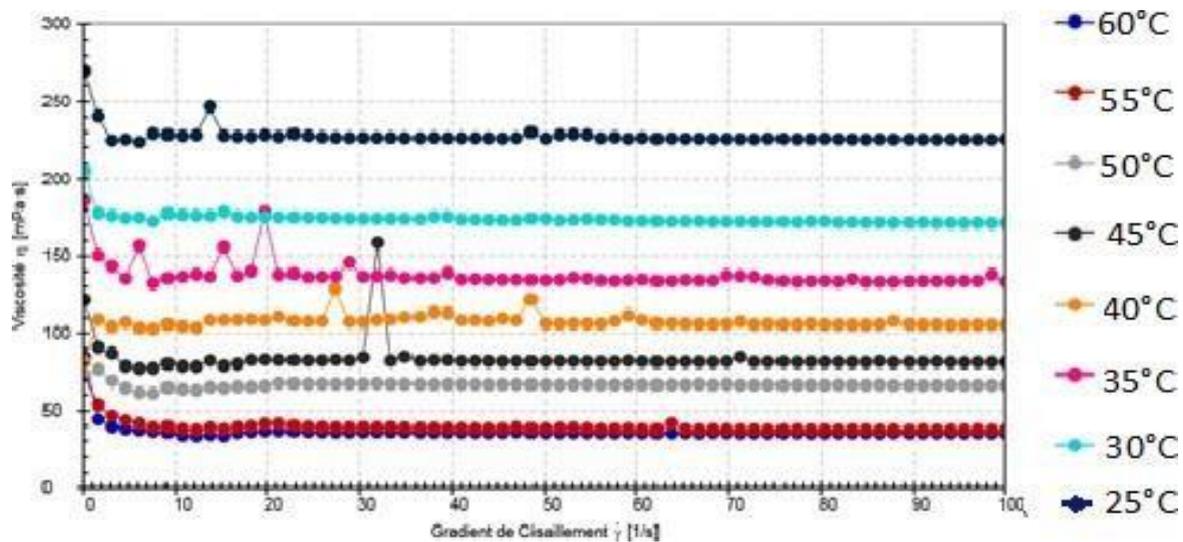


Fig. IV. 10: Variations de la viscosité apparente en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 1.25% en polluant



**Fig. IV. 11:** Variations de la viscosité apparente en fonction du gradient de cisaillement à différentes températures pour une fraction massique de 2% en polluant.

#### IV.4 Réponses des tests dynamiques

La réponse de l'échantillon à la sollicitation sinusoïdale est donnée par l'évolution des modules de stockage  $G'$  et de perte  $G''$  en fonction de la fréquence angulaire [rad/s].

Dans cette étude tous les tests dynamiques ont été réalisés en domaine linéaire. Les figures (IV.12), (IV.13) et (IV.14), montrent qu'un échantillon d'huile polluée préparé à un comportement viscoélastique, dépendant de la fréquence. Il ressort que le module  $G'(\omega)$  qui correspond à la composante élastique de la réponse et qui traduit donc l'énergie stockée dans le matériau est supérieure que le module  $G''(\omega)$  qui représente une quantité proportionnelle à l'énergie dissipée lors de la déformation. Cette perte est due de la viscosité.

Pour les tests dynamiques, nous avons choisi trois fractions massiques : 0,25%, 1.25% et 2%. Les essais ont été réalisés aux températures suivantes : 20°C, 40°C et 60°C

Nous avons donc également étudié l'effet de la température de l'huile polluée. Les résultats obtenus montrent que la température influe sur l'échantillon. Souvent, les tests dynamiques prennent une place importante dans ce type de caractérisation en se basant sur l'évolution des deux modules de conservation et de perte.

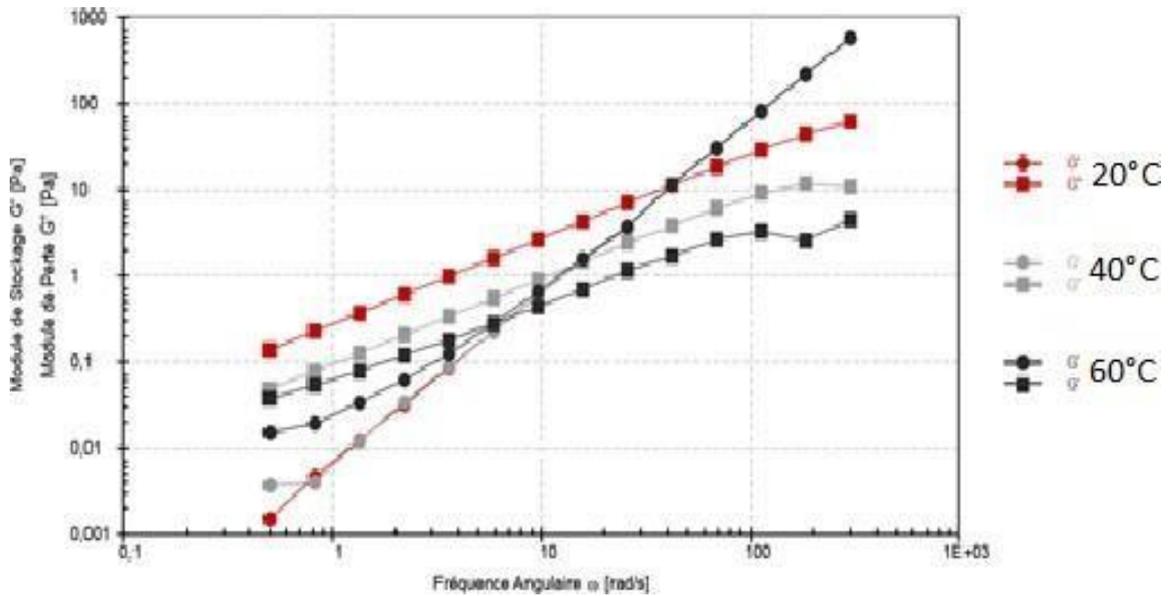


Fig. IV. 12: Comparaison entre les paramètres viscoélastiques ( $G'$  et  $G''$ ) pour une fraction massique de 0.25% en polluant.

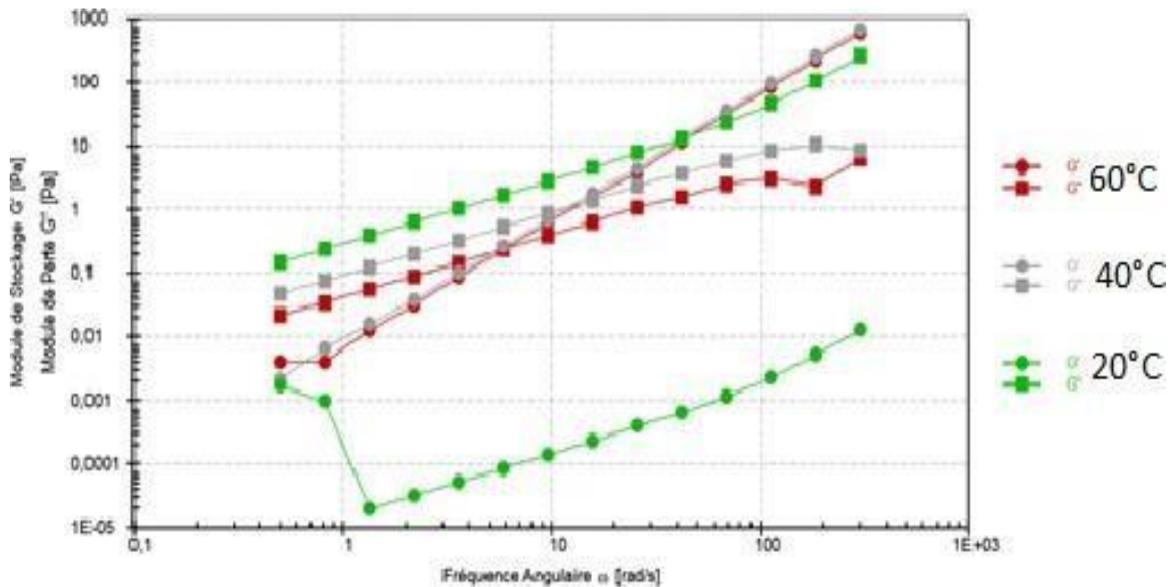
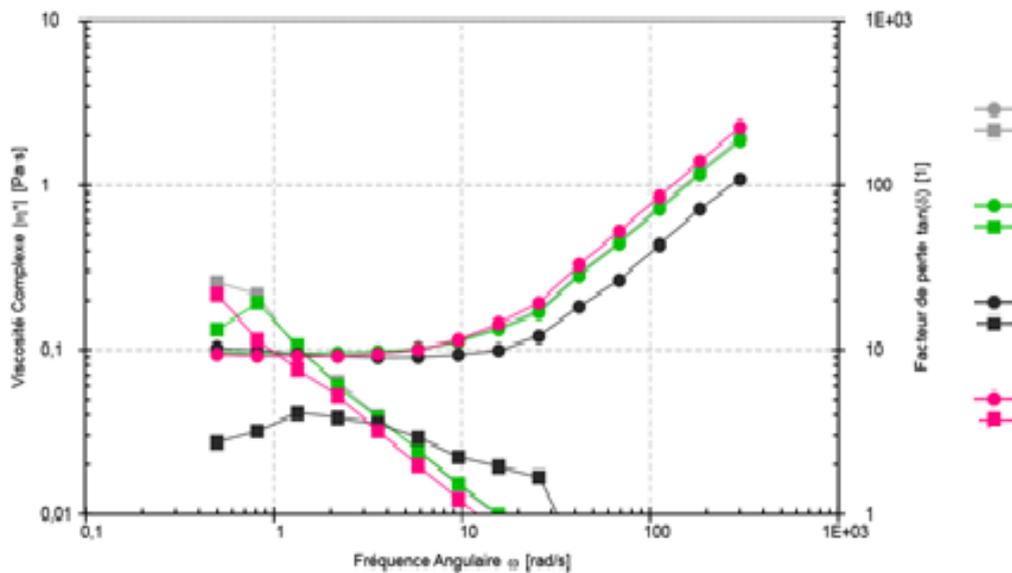


Fig. IV. 13: Comparaison entre les paramètres viscoélastiques ( $G'$  et  $G''$ ) pour une fraction massique de 1.25% en polluant.

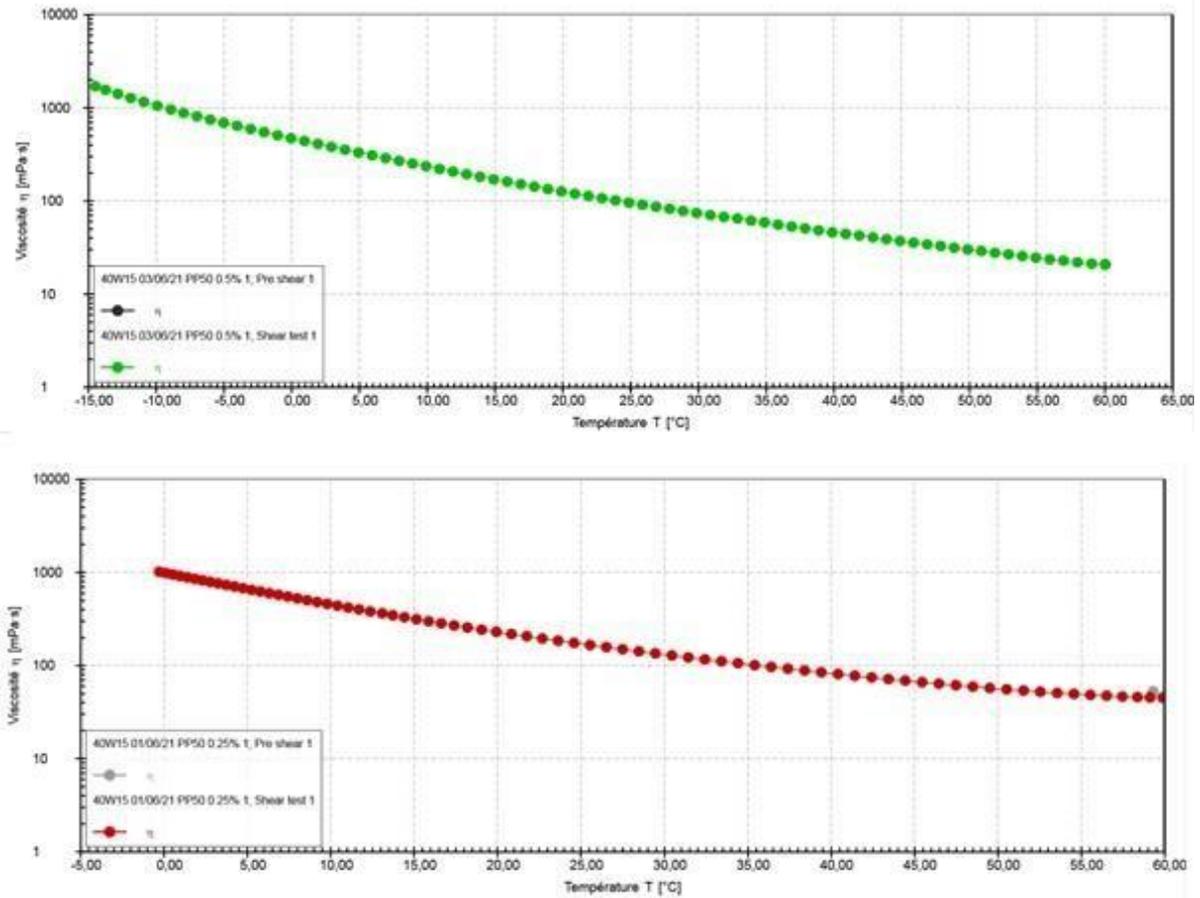


**Fig. IV. 14:** Comparaison entre les paramètres viscoélastiques ( $G'$  et  $G''$ ) pour une fraction massique de 2% en polluant.

#### IV.5 Réponses des tests de rampe de températures

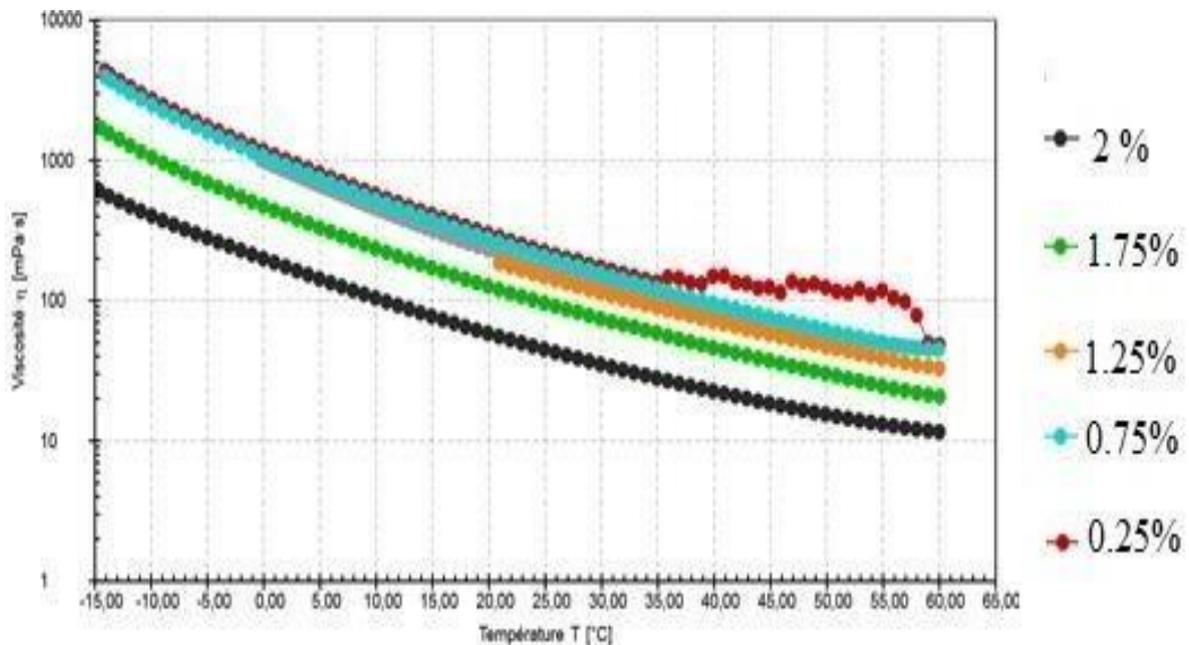
Les additifs peuvent modifier les propriétés physiques de l'huile de moteur 15W40, en particulier le point de congélation et l'indice de viscosité. Ils peuvent aussi avoir une action chimique en inhibant l'oxydation et la corrosion, d'autres sont destinés aux hautes pressions. Certains additifs ont plusieurs activités. Ainsi, certaines substances abaissent le point de fusion et en même temps améliorent le comportement viscosité-température. La condition principale pour le rendement complet de l'additif reste la présence de base de haute valeur préparée par les meilleures méthodes de fabrication. Ça peut être l'huile de graissage ou minérale ou synthétique.

Sur la figure (IV.15), nous avons représenté deux courbes séparées sur la variation de la viscosité apparente en fonction de la température de l'huile CHELIA 15W40 et pour deux fractions massiques différentes en polluant : 0,25% et 1.25%. Nous constatons que la viscosité apparente diminue avec l'augmentation de la température et augmente avec la fraction massique en polluant.



**Figure IV. 15:** Variation de la viscosité apparente en fonction de la température de l'huile moteur 15W40 et pour deux fractions massiques 0.25% et 1.25%.

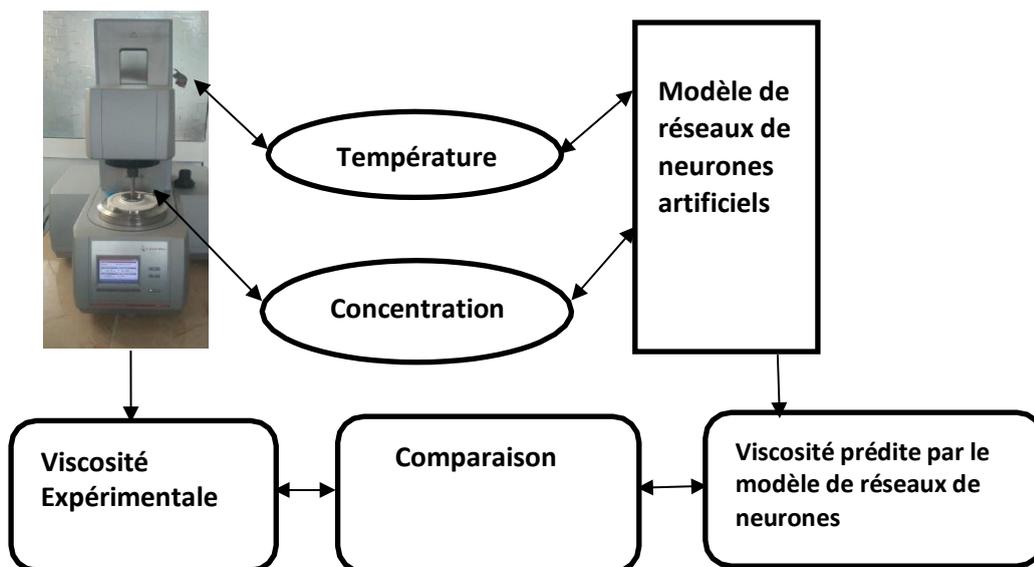
Sur la figure (IV.16), nous avons rassemblé les courbes de variation de la viscosité apparente en fonction de la température et pour différentes fractions massiques de polluant. Nous constatons que plus la concentration en polluant dans l'huile est élevée et plus la diminution de la viscosité est rapide, dans la progression de la température de -15°C à 60°C. Il existe une relation inverse entre la viscosité et la température.



**Fig. IV. 16:** Variations de la viscosité apparente en fonction des différentes températures pour l'huile CHELIA 15W40 à 0.25%; 0.75% ;1.25% ;1.75% et 2%.

### IV.6 Résultats de prédiction par les réseaux de neurones

Le modèle neuronal développé par l'utilisation de l'environnement MATLAB®, est basé sur l'ensemble des résultats expérimentaux. Les paramètres utilisés par le modèle de neurones sont comme illustré sur la figure (IV.17).

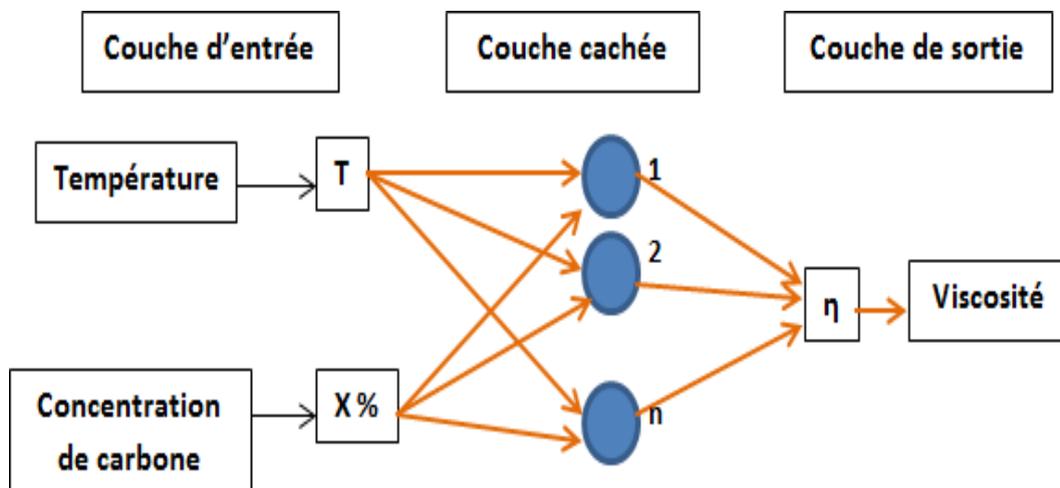


**Fig. IV.17 :** Les paramètres utilisés par le modèle de neurones

Ce modèle est composé de 72 vecteurs d'entrées et de leurs vecteurs de sortie. Les valeurs, d'entrées et de sorties des réseaux sont redimensionnées pour avoir des variables, variant entre -1 et 1, afin de rendre le réseau plus efficace et avoir de meilleurs résultats. Ces données sont divisées en trois sous-ensembles.

Le premier est celui de la formation ou de l'apprentissage et représente (70%) de l'ensemble des données. Il est utilisé pour le calcul du gradient et la mise à jour des poids et des biais du réseau afin de minimiser la fonction de performance du réseau. Le second sous-ensemble est celui de la validation et représente (15 %) des données totales. Le test est la dernière étape, où le modèle du réseau neuronal entraîné est évalué par un ensemble de données qui n'ont pas été utilisés pour la formation du réseau. Enfin, le sous-ensemble de test qui représente (15 %) des données totales, est utilisé après l'étape de formation et de validation du modèle neuronal pour un test final.

Les perceptrons multicouches utilisés dans cette étude sont présentés par une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie, comme le montre la figure (IV.17).



**Fig. IV.18 :** Variables d'entrées utilisés pour prédire la viscosité d'huile polluée

Les variables de la température d'huile et la concentration de charbon sont utilisées comme des paramètres d'entrées dans le modèle de réseaux de neurones. La viscosité d'huile est utilisée comme paramètre de sortie comme le montre à la figure (IV.18).

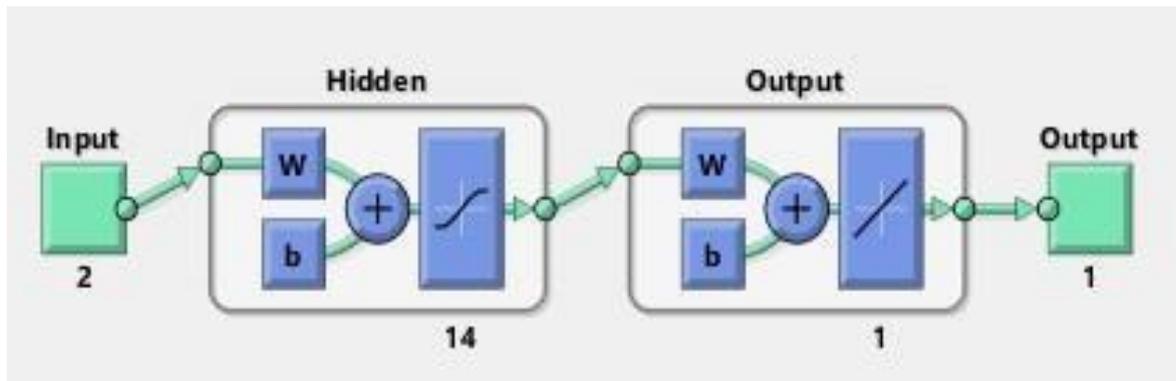


Fig. IV.19 : Structure du réseau de neurones pour prédire la viscosité d'huile 15W40

Le nombre de neurones de la couche cachée a été sélectionné par plusieurs essais pour estimer le modèle. On constate que le nombre de couche cachée utilisé pour prédire la température à la sortie du déshumidificateur est de 14 neurones.

Notre modèle qui est basé sur le réseau perceptron multicouche d'architecture, utilise l'algorithme d'apprentissage de rétro - propagation (Back-Propagation). Cet algorithme est actuellement l'outil le plus utilisé dans le domaine des réseaux de neurones [40]. C'est une technique de calcul des dérivées qui peut être appliquée à n'importe quelle structure de fonctions dérivables. Cette méthode est basée mathématiquement sur l'algorithme de descente du gradient et utilise les règles de dérivation des fonctions dérivables de telle façon que l'erreur commise en sortie du réseau est rétro-propagée vers les couches cachées.

La performance du modèle a été évaluée par l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de détermination (R) :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_i (y_p - y_d)^2 \quad (\text{IV.1})$$

$$R_2 = 1 - \left( \frac{\sum (y_p - y_d)^2}{\sum (y_p)^2} \right) \quad (\text{IV.2})$$

Avec ;

n: est le nombre de données,

$y_k$  : sont les sorties du réseau,

$y_d$  : sont les données désirées.

## IV.6.1 Modélisation de la viscosité

La figure (IV.20) montre l'évolution des erreurs quadratiques moyennes. Ces dernières diminuent continuellement jusqu'à des valeurs suffisamment faibles et qui montrent que les poids sont améliorés et que le réseau s'est formé.

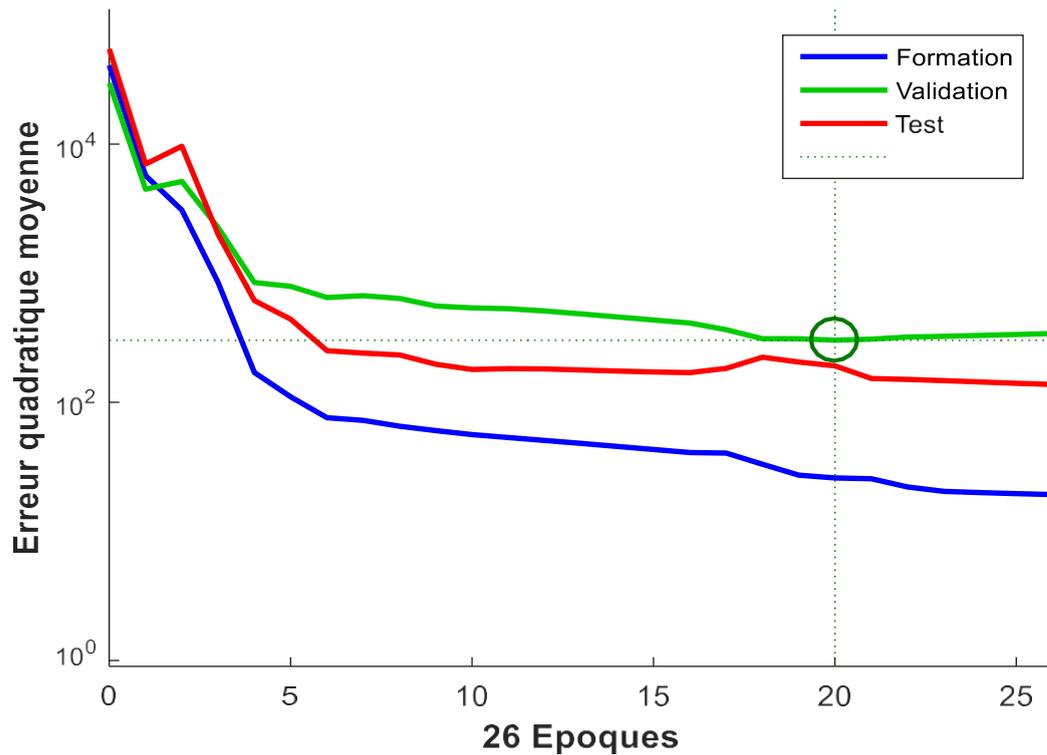


Fig. IV. 20 : Erreur quadratique moyenne pour la formation, validation et de test

La figure (IV.21) montre les graphiques des coefficients de régression (R), dans lesquels les cercles sont les points de données et la ligne représentant le meilleur ajustement entre les résultats prédits et les résultats réels. Les coefficients de régression obtenus lors de la formation, la validation et le test de notre modèle sont parfaits et dans les limites acceptables par la configuration étudiée.

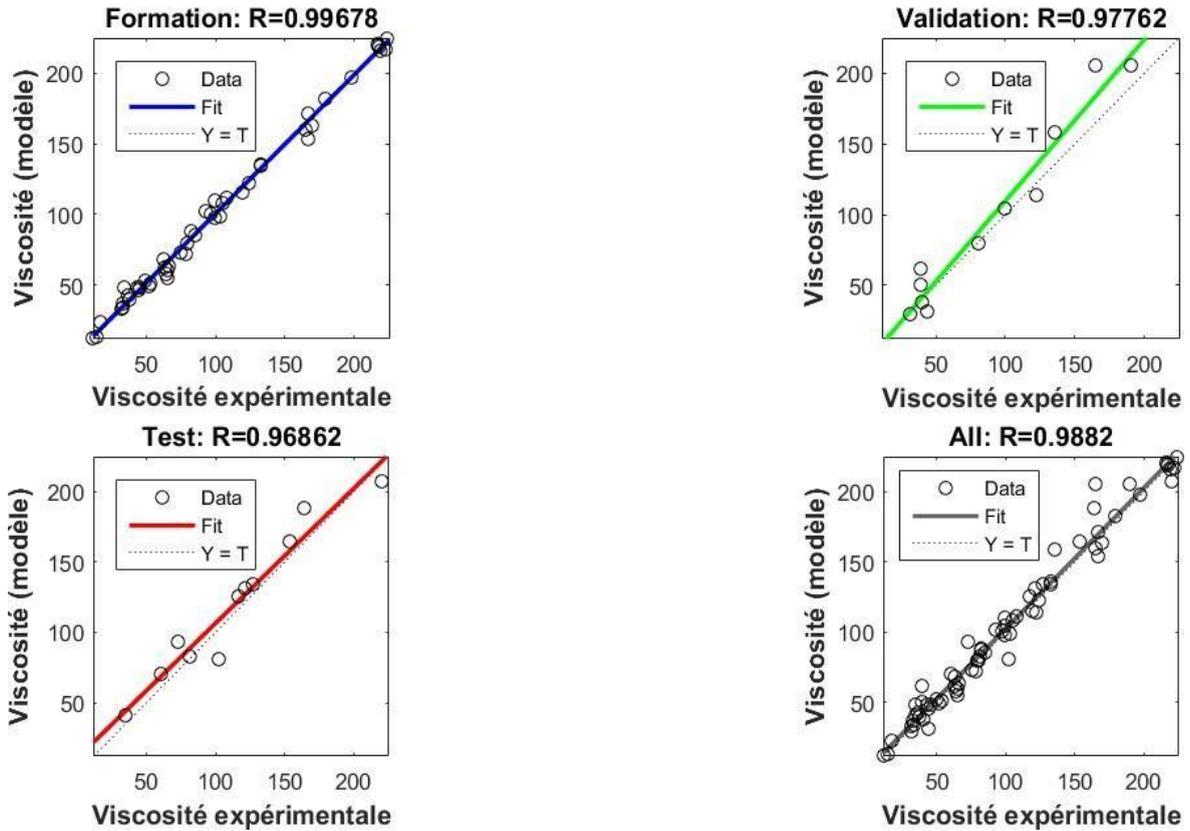


Fig. IV.21 : Coefficient de régression obtenu lors de la formation, validation et test.

#### IV.6.2 Comparaison des résultats expérimentaux et prédits

La figure IV.22 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits de la viscosité d'huile. Les valeurs prédites par le modèle sont en excellent accord avec l'expérience. Lorsque le coefficient de régression s'approche de 1, la précision de la prédiction s'améliore. Dans notre cas, le coefficient de régression est de 0.996, ce qui indique une excellente concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits.

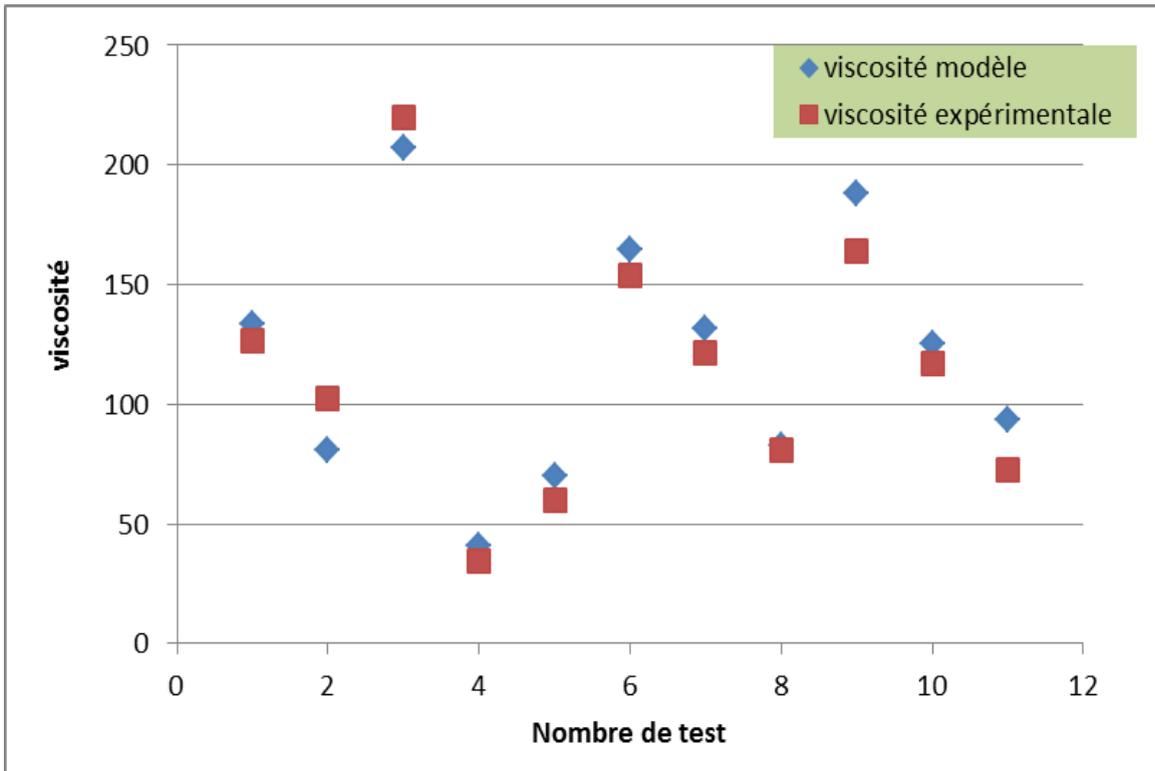


Fig. IV.22 : Comparaison des viscosités expérimentales et prédites

Ces résultats suggèrent qu'un modèle de calcul fiable pourrait être utilisé pour prédire la viscosité d'huile sous les différents paramètres comme la température et la concentration de charbon.



---

## ***Conclusion Générale***

---



## Conclusion générale

---

Pour approfondir nos connaissances en rhéologie, nous avons choisi le sujet sur la prédiction des caractéristiques d'une huile usagée d'un moteur à combustion interne. Dans ce travail nous avons essayé de répondre à la problématique : peut-on prédire à temps qu'une huile lubrifiante ne remplit plus sa tâche convenablement après un certain temps d'usage ? Ceci dans l'objectif de développer un outil de prédiction des caractéristiques d'une huile lubrifiante de fabrication nationale.

Au cours de l'élaboration de ce projet et après nos recherches bibliographiques sur les huiles usagées d'un moteur à combustion interne d'une part et les réseaux de neurones d'autre part, nous nous sommes tout d'abord initiés, à travers nos recherches sur internet, entre autres à la programmation sur MATLAB. Cette première ébauche nous a permis d'établir avec notre directeur de projet la suite du développement de notre travail.

Parmi les questions que nous avons abordées, le comportement rhéologique d'une huile lubrifiante neuve et une huile polluée, toutes les deux, de fabrication nationale par une série de mesures à l'aide d'un rhéomètre. Cette étape nous a permis de simuler l'endommagement des propriétés d'un lubrifiant au cours de son utilisation.

Des mesures rhéologiques ont été réalisées sur une huile lubrifiante neuve de fabrication nationale, afin de déterminer l'évolution de sa viscosité en fonction de la quantité de suie ou de charbon ajoutée dans notre cas. Les résultats de ces essais sont en bon accord avec les résultats trouvés dans la littérature.

D'autre part, l'étude numérique par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels nous a permis d'obtenir un modèle permettant de prédire la durée de vie du lubrifiant que nous avons choisi. La validité expérimentale du modèle nous a permis de réaliser un outil pour la prédiction des caractéristiques de l'huile lubrifiante usagée de fabrication nationale utilisée dans les moteurs à combustion interne.

Les résultats obtenus montrent qu'on peut optimiser le temps d'utilisation de l'huile lubrifiante d'un moteur à combustion interne. Ces résultats contribueront à une meilleure compréhension de l'altération de l'huile de lubrification dans les moteurs à combustion interne, à prédire et à déceler des anomalies caractéristiques telles que la

## **Conclusion générale**

---

contamination par des particules internes à l'équipement ou le type d'usure par exemple pour faire de la maintenance préventive.

Pour finir le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études est bien intéressant et mérite d'être poursuivi pour une meilleure gestion de la question de la dégradation des huiles lubrifiantes de fabrication nationale.



---

*Références bibliographiques*

---



## Références bibliographiques

---

- [1] Martin A., L'automobile : La technique automobile de l'apprentissage à la maîtrise, Edition Livre total Lausanne, 1995.
- [2] <https://www.terre-net.fr/materiel-agricole/tracteur-quad/article/fonctionnement-du-moteur-thermique-207-100752.html>.
- [3] Borghi R., Destriau M., Combustion and flames : Chemical and physical principles, Edition Technip, 1998.
- [4] Guibet J.-C., Carburants et Moteurs - Tome 1, Edition Technip, 1997.
- [5] Brun R., Science et technique du moteur Diesel industriel et de transport, Tome 1, Edition Technip, 1981.
- [6] Raynal B., Moteurs thermiques et pollution atmosphérique : origine et réduction des polluants, Edition Techniques de l'Ingénieur, 1982, B378.
- [7] Pires Da Cruz A., Aspects fondamentaux de la combustion en phase gazeuse, ENSPM, 2002.
- [8] Frenklach M., Clary D.W., Gardiner J., Stein S.E., Detailed Kinetic Modeling of Soot Formation in Shock-Tube Pyrolysis of Acetylene, The 20th Inter, Symp, on Combustion, The combustion Institute, Pittsburgh, USA, 1984, pp. 887-901.
- [9] Berglund P.M., Petersson G., Hazardous petrol hydrocarbons from refuelling with and without vapour recovery, The Science of the Total Environment, 1990, 91, pp. 49-57.
- [10] Deschamps F., Deschamps-Boulanger S., L'asthme professionnel en 1997, Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique, 1997, 37(3), pp. 279-285.
- [11] Grimmer G., Contribution of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitro derivatives to the carcinogenic impact of diesel engine exhaust condensate evaluated by implantation into the lungs of rats, Cancer Letters, 1987, 37, pp. 173-180.
- [12] Mustafa M.G., Effects of nitrogen dioxide on lung metabolism, in "Nitrogenous Air Pollutants: Chemical and biological implications", (Ed. Grosjean D.), Ann Arbor Science, 1979, pp. 165-178.
- [13] Voisin C., Approche 'in vitro' de l'action des polluants gazeux d'origine automobile sur la défense phagocytaire de l'appareil respiratoire, Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique, revue n° 85, 1980, pp. 44-49.
- [14] Veninga T., Comparison of biological effects of NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and combinations of both oxidants, in "Air pollution by nitrogen oxides", Ed. Schneider T., Grant L., Elsevier Amsterdam, 1982, pp. 441-445.

## Références bibliographiques

---

- [15] Seinfeld J.H., Pandis S.N., Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. New York : Wiley; 1998, p. 1326.
- [16] Dockery D.W., Pope C.A., Xu X., An association between air pollution and mortality in six US cities, The New England Journal of Medicine, 1993, 329, pp. 1753-1759.
- [17] Ayel J., Born M., Lubrifiants et fluides pour l'automobile, Edition Technip, 1998.
- [18] Lecompte M., 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, Université de Rouen, Thèse, 2007.
- [19] Ayel J., Lubrifiants : Constitution, Edition Techniques de l'ingénieur, 1997, B5341.
- [20] Ayel J., Lubrifiants : Additifs à action chimique, Edition Techniques de l'ingénieur, 2001, B5343.
- [21] Ayel J., Lubrifiants : Additifs à action physique ou physiologique, Edition Techniques de l'ingénieur, 2002, B5344.
- [22] Abd-Alla G.H., Using EGR in internal combustion Engine : A review, Energy Conversion and Management, 2002, 43(8), pp.1027-1042.
- [23] Ladommatos N., Abdelhaim S.M., ZHAO H., The effect of EGR on combustion and NOx emissions in a high-speed direct-injection diesel engine, SAE Paper 1996, N°96-0840.
- [24] Doyle D., EGR system and lubricating oil in Diesel engines, Practicing Oil Analysis Magazine (2002).
- [25] Tokura N., Terasaka K., Yasuhara S., Process through which soot intermixes into lubricating oil of a Diesel engine with EGR, SAE Paper, 1991, n°1982-0082.
- [26] Trujllo G., Resetting Oil Analysis Parameters for Changing Diesel Engines, Practicing Oil Analysis, 2004.
- [27] Denis A.J., The effect of EGR on Diesel engine wear, SAE Paper, 1999, n°1999-01-0839.
- [28] Mainwaring R., Soot and wear in heavy duty Diesel engines, SAE Paper, 1997, n°1997-1631.
- [29] G. Couarraze, J.L. Grossiord et N. Huang, Initiation à la rhéologie, 4<sup>e</sup> édition Lavoisier Tec & Doc, 2014.

## Références bibliographiques

---

- [30] Bird RB, Armstrong RC, Hassager O (1977). Dynamic of polymeric liquids. Fluid Mechanics, J. Wiley and Sons, New York.
- [31] Howard Demuth Mark Beale, "Neural Network Toolbox For Use with MATLAB®", [http://www.image.ece.ntua.gr/courses\\_static/nn/matlab/nnet.pdf](http://www.image.ece.ntua.gr/courses_static/nn/matlab/nnet.pdf).
- [32] « réseau de neurones artificiels » [archive], Le Grand Dictionnaire terminologique, Office québécois de la langue française (consulté le 28 janvier 2020).
- [33] <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037783813>.
- [34] [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau\\_de\\_neurones\\_artificiels# Gerstner 2004](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_neurones_artificiels#Gerstner2004).
- [35] <https://medium.com/@davidroman00/r%C3%A9seaux-neuraux-pour-les-nuls-a7f5f63b1c10>.
- [36] P.E. Keller Commercial applications of artificial neural networks.
- [37] Alp Mestan, Introduction aux Réseaux de Neurones Artificiels Feed Forward, <http://alp.developpez.com/tutoriels/intelligence-artificielle/reseaux-de-neurones>, 2008.
- [38] Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture Rome, 1983 Techniques simples de carbonisation.
- [39] <http://univ-bejaia.dz/dspace/123456789/12577>.
- [40] Sun lian-Ming et Meunier Francis., Adsorption. Aspects théoriques. Technique de l'ingénieur (2003).

# Résumé

Ce mémoire est rédigé dans le cadre du projet de fin d'études concernant la prédiction des caractéristiques, après un temps d'usage, d'une huile lubrifiante d'un moteur à combustion interne.

Afin de prévenir la surchauffe des pièces métalliques qui entrent en contact les unes avec les autres dans un moteur à combustion interne, on utilise une huile lubrifiante. Cette dernière soumise à de fortes températures, se dégrade et perd progressivement ses propriétés lubrifiantes. Par conséquent elle doit être changée pour éviter la destruction du moteur.

D'une manière générale, les mécanismes lubrifiés sont susceptibles d'être surveillés dans leur fonctionnement par analyse de leur lubrifiant en service. Peut-on donc prédire à temps qu'une huile lubrifiante ne remplit plus sa tâche convenablement après un certain temps d'usage ? Pour répondre à cette problématique, nous nous sommes fixés comme objectif dans ce travail le développement d'un outil de prédiction des caractéristiques d'une huile lubrifiante d'un moteur à combustion interne.

Pour mener à bien ce travail, nous avons dans une première étape fait entre autres plusieurs séries d'analyses rhéologiques sur une huile lubrifiante de fabrication nationale pour moteur à combustion interne et dans une deuxième étape une étude numérique par l'application de l'approche de réseaux de neurones artificiels pour la prédiction des caractéristiques de l'huile lubrifiante usagée.

Les premiers résultats obtenus sont particulièrement prometteurs. Ils contribueront à une meilleure compréhension de l'altération de l'huile de lubrification dans les moteurs à combustion interne, à prédire et à déceler des anomalies caractéristiques telles que la contamination par des particules internes à l'équipement ou le type d'usure par exemple pour faire de la maintenance préventive.

**Mots-clés :** Moteur à combustion interne ; Huile lubrifiante ; Analyses rhéologiques ; Prédiction ; Réseaux de neurones.