

N° d'ordre : 14/2010 -M/PH

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
« HOUARI BOUMEDIENNE »

FACULTE DE PHYSIQUE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

En : Physique

Spécialité : Energétique et Mécanique des Fluides

Par : **HADDAD Fadila**

Sujet

**EFFET DU VIEILLISSEMENT
SUR LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES
DE CERTAINES HUILES LUBRIFIANTES**

Soutenu publiquement le 16-03-2010 devant le jury composé :

M.	CHELGHOU M.	Professeur (USTHB)	Président
Mme.	AMOURA LOUNI M.	Maître de Conférences (USTHB)	Directrice de thèse
M.	ZERAIBI N.	Professeur (UMBB)	Examineur
M.	KESSAL M.	Professeur (UMBB)	Examineur
M.	BENZAOUI A.	Maître de Conférences, USTHB	Examineur
Melle.	MAAMAR D.	Cadre (NAFTAL)	Invitée

Remerciements

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Thermodynamique et des Systèmes Energétiques (LTSE) de la faculté de physique en collaboration avec la société nationale NAFTAL sans la contribution de laquelle ce Magister n'aurait pas pu aboutir.

L'étude a été dirigée par madame M.AMOURA LOUNI maître de conférence à l'USTHB. Quelle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et mon profond respect.

Je remercie vivement Monsieur A.BOUABADALLAH directeur du LTSE pour m'avoir accepté dans son laboratoire.

Je suis très reconnaissante envers monsieur C.CHELGHOU, Professeur à l'USTHB, pour avoir accepté de présider le jury.

J'adresse mes remerciements à monsieur M.KESSAL et monsieur N.ZERAIBI, tous deux Professeurs à l'université M'HAMED BOUGARA de Boumerdès (UMBB) d'avoir accepté de juger ce travail et de faire partie du jury.

Je tiens à remercier tout particulièrement monsieur A.BENZAOUÏ maître de conférence à l'USTHB, de m'avoir accueillie au sein de son équipe et d'avoir accepté de juger ce travail. Je le remercie également pour sa gentillesse et ses encouragements continus.

Je remercie également mademoiselle D.MAAMAR cadre à l'entreprise nationale NAFTAL, de faire partie du jury.

Je remercie très vivement le professeur M.ABADLIA et A.BENMOUNAH qui m'ont accueillie au sein du Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites (LMMC) de la faculté des sciences de l'ingénieur de l'université M'HAMED BOUGARA à Boumerdès (UMBB) et en particulier A.GUECIOUER qui a suivi de près toutes mes expériences.

Mes remerciements vont également à Mme N.BENSIAM qui m'a accueillie au sein du laboratoire AVM de NAFTAL et Melle I.ZIANE qui m'a accompagnée durant toutes mes expériences. Je garderai un très bon souvenir des différents membres du laboratoire et je tiens à les remercier tous.

Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe du laboratoire de Thermodynamique et des Systèmes Energétiques (LTSE) pour leur amabilité.

Enfin, je remercie très chaleureusement toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

ABREVIATIONS ET ACRONYMES.....	1
INTRODUCTION GENERALE.....	2

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES LUBRIFIANTS

INTRODUCTION.....	5
1 LES DIFFERENTS TYPES DE LUBRIFIANTS.....	7
1.1 Les lubrifiants gazeux.....	7
1.2 Les lubrifiants liquides.....	7
1.3 Les lubrifiants semi-solides.....	7
1.4 Les lubrifiants solides.....	8
2 LES ROLES DU LUBRIFIANT.....	8
2.1 La lubrification des moteurs à combustion interne.....	10
2.2 La lubrification des transmissions mécaniques.....	11
2.3 La lubrification des organes de pression.....	12
3 LES PROPRIETES DU LUBRIFIANT.....	12
3.1 Les propriétés rhéologiques.....	13
3.1.1 Viscosité.....	13
3.1.2 Point d'écoulement.....	17
3.1.3 Pompabilité.....	17
3.1.4 Filtrabilité.....	18
3.2 Les propriétés de masse.....	18
3.2.1 Masse volumique.....	18
3.2.2 Compressibilité.....	19

3.3 Les propriétés chimiques.....	19
3.3.1 Stabilité à l'oxydation.....	19
3.3.2 Indice d'acide (TAN) et de base (TBN)	20
3.3.3 Teneurs en additifs.....	20
3.3.4 Corrosion.....	21
3.3.5 Stabilité thermique.....	21
3.4 Les propriétés thermiques.....	22
3.4.1 Conductivité thermique.....	22
3.4.2 Capacité thermique massique.....	22
3.4.3 Volatilité.....	22
3.4.4 Point éclair.....	23
3.5 Les propriétés optiques.....	23
3.5.1 Couleur.....	23
3.5.2 Indice de réfraction.....	23
3.6 Les propriétés superficielles.....	24
3.6.1 Solubilité des gaz.....	24
3.6.2 Désaération.....	24
3.6.3 Moussage.....	25
3.6.4 Désémulsion.....	25
3.7 Les propriétés mécaniques.....	26
3.7.1 Coefficient de frottement.....	26
3.7.2 Capacité anti-usure.....	26
3.7.3 Résistance au cisaillement.....	27
3.8 Les propriétés électriques.....	28
3.8.1 Conductivité et résistance.....	28
3.8.2 Rigidité diélectrique.....	28
3.9 Autres propriétés.....	28
4 LA COMPOSITION DES LUBRIFIANTS LIQUIDES.....	29
4.1 L'huile de base.....	29
4.2 Les additifs.....	30
4.2.1 Les additifs de protection.....	32
4.2.1.1 Les additifs anti-usure.....	32
4.2.1.2 Les additifs extrême pression.....	32
4.2.1.3 Les additifs inhibiteurs de corrosion.....	32

4.2.1.4 Les additifs détergents.....	32
4.2.1.5 Les additifs dispersants.....	33
4.2.1.6 Les additifs anti-mousses.....	33
4.2.1.7 Les additifs anti-oxydants.....	33
4.2.2 Les additifs améliorant les caractéristiques.....	33
4.2.2.1 Les additifs améliorant le point d'écoulement.....	33
4.2.2.2 Les additifs modificateurs de viscosité.....	34
4.2.2.3 Les additifs de compatibilité de joints.....	34
4.2.2.4 Autres caractéristiques.....	34

CHAPITRE II : LE VIEILLISSEMENT ET DEGRADATION DU LUBRIFIANT EN SERVICE

INTRODUCTION.....	36
1 VIEILLISSEMENT ET DEGRADATION DU LUBRIFIANT.....	37
1.1 L'oxydation du lubrifiant.....	38
1.2 La variation de la viscosité.....	39
1.3 La contamination par un liquide.....	41
1.3.1 Contamination par l'eau.....	41
1.3.2 Contamination par le carburant ou d'autres liquides.....	41
1.4 La contamination par les produits non liquides.....	42
1.4.1 Les contaminants solides générés.....	42
1.4.2 Les contaminants solides ingérés.....	43
2 LES DIFFERENTS MODES DE SUIVI DE LA DEGRADATION DES LUBRIFIANTS	44
2.1 Le suivi hors ligne.....	44
2.1.1 Principe du suivi hors ligne.....	44
2.1.2 Synthèse sur le suivi hors ligne.....	45
2.2 Le suivi par modèles prédictifs	46
2.2.1 Principes du suivi par modèle prédictif.....	47

2.2.2 Synthèse sur le suivi par modélisation.....	47
2.3 Le suivi en ligne du lubrifiant avec un capteur embarqué.....	48
2.3.1 Principe du suivi en ligne.....	49
2.3.2 Synthèse sur le suivi en ligne avec un capteur embarqué.....	50

CHAPITRE III : CLASSIFICATIONS ET SPECIFICATIONS

INTRODUCTION.....	51
1 CLASSIFICATIONS.....	52
1.1 Classification de viscosité SAE.....	52
1.2 Classification de service API.....	53
1.3 Classification ILSAC.....	53
2 SPECIFICATIONS.....	54
2.1 Spécifications européennes CCMC/ACEA.....	54
2.2 Spécifications des constructeurs européens et américains.....	54
2.3 Spécifications militaires.....	54

CHAPITRE IV : CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DES HUILES MOTEUR USAGEES NAFTILIA SUPER SAE 20W50 Et CHELIA VP SUPER SAE 20W40

INTRODUCTION.....	56
1 METHODOLOGIE APPLIQUEE.....	57
1.1 Détermination de l'échantillon.....	57
1.2 Outils et normes d'analyses suivis.....	58
1.3 Processus de suivi des deux lubrifiants.....	58

2 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU LUBRIFIANT "NAFTILIA SAE

20W50".....	60
2.1 Caractéristiques physico-chimiques principales de l'huile neuve.....	60
2.2 Caractéristiques physico-chimiques principales de l'huile usée.....	60
2.3 Interprétation des résultats d'analyse.....	61
2.3.1 Viscosité cinématique.....	61
2.3.2 Indice de viscosité.....	64
2.3.3 Etude rhéologique du lubrifiant.....	65
2.3.3.1 Dispositif de mesure.....	65
2.3.3.2 Principe du viscosimètre de Couette.....	66
2.3.3.3 Conduite des expériences au viscosimètre.....	67
2.3.3.4 Rhéologie du lubrifiant SAE 20W50	67
2.3.3.5 Evolution de la viscosité dynamique en fonction de la température.....	72
2.3.3.6 Evolution de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement.....	78
2.3.4 Mesure du TAN et TBN.....	82
2.3.5 Mesure de cendres.....	83
2.3.5.1 Cendres sulfatées.....	84
2.3.5.2 Carbone Conradson.....	85
2.3.6 Détermination de la teneur en éléments des lubrifiants.....	86
2.3.6.1 Détermination de la teneur en métaux d'usure.....	88
2.3.6.2 Détermination de la teneur en éléments provenant des additifs.....	91
2.3.6.3 Détermination de la teneur en éléments provenant des polluants.....	93

3 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU LUBRIFIANT "CHELIA VP

SUPER SAE 20W50".....	95
3.1 Caractéristiques physico-chimiques principales de l'huile neuve.....	95
3.2 Caractéristiques physico-chimiques principales de l'huile usée.....	95
3.3 Interprétation des résultats d'analyse.....	97
3.3.1 Viscosité cinématique	97
3.3.2 Etude rhéologique du lubrifiant.....	98
3.3.2.1 Rhéologie du lubrifiant SAE 20W40.....	99

3.3.2.2 Evolution de viscosité dynamique en fonction de la température.....	102
3.3.2.3 Evolution de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement.....	107
3.3.3 Mesure du TAN et TBN.....	110
3.3.4 Mesure des cendres.....	110
3.3.4.1 Cendres sulfatées.....	111
3.3.4.2 Carbone Conradson.....	111
3.3.5 Détermination de la teneur en éléments des lubrifiants.....	112
3.3.5.1 Détermination de la teneur en métaux d'usure.....	113
3.3.5.2 Détermination de la teneur en éléments provenant des additifs.....	114
3.3.5.3 Détermination de la teneur en éléments provenant des polluants.....	114
 CONCLUSION GENERALE.....	 115
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	116
ANNEXE A.....	120
ANNEXE B.....	121

Abréviations et Acronymes

ACEA	Association Européenne des Constructeurs d'Automobiles
AFNOR	Association Française de Normalisation
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
CCE	Commission des Communautés Européennes
CCM	Comité des Constructeurs d'automobiles du Marché Commun
CEC	Conseil Européen de Coordination pour le développement des essais de performance des lubrifiants et des combustibles pour moteurs
CETIM	Centre Technique des Industries Mécaniques
ILSAC	International Lubricant Standardisation and Approval Committee
ISO	International Organisation for Standardization
NF	Norme Française
NPA	National Petroleum Association
SAE	Society of Automotive Engineers
TAN	Total Acid Number
TBN	Total Base Number
ch	Chevaux
v.o	vase ouvert
ppm	partie par million
W	watt

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les lubrifiants, comme toutes les pièces des équipements mécaniques que nous utilisons, subissent un phénomène de dégradation de leurs caractéristiques à la fois physiques et chimiques sous l'influence des contraintes externes. L'impact d'une telle évolution dans le temps est de les rendre inaptes à remplir leurs fonctions de base à un moment donné. On a alors recours à la technique dite de « vidange » et qui consiste à remplacer une charge d'huile usée par une autre de mêmes caractéristiques mais à l'état neuf.

Les lubrifiants sont considérés comme un des produits les plus importants pour l'industrie automobile par sa production et sa consommation¹[1]. L'évolution constante de cette industrie oblige les constructeurs automobiles à travailler en étroite collaboration avec les principaux fabricants de lubrifiants. Ainsi les lubrifiants et les fluides pour l'automobile doivent répondre aux contraintes imposées par de nouvelles technologies, permettre des économies d'énergie, contribuer à la réduction des émissions de polluants et durer de plus en plus longtemps. Ils ont aussi à satisfaire un ensemble complexe de spécifications internationales et nationales dont le rythme de changement va en s'accéléralant.

La qualité des produits utilisés pour la lubrification des moteurs d'automobiles est essentielle pour leur longévité. En effet, l'huile lubrifiante est l'un des facteurs les plus importants affectant la vie du moteur. Tout changement dans sa composition ou propriétés physico-chimiques, pendant la durée de vie, peut être classifié comme processus de vieillissement. Lors de la circulation, l'huile dans le moteur ramasse une série de contaminants, y compris la saleté et les métaux lourds [2]. L'huile souillée peut obstruer des pièces de moteur et ceci peut avoir comme conséquence le besoin de réparation de moteur et de remplacement de parties.

Le formidable essor de l'industrie de l'automobile est incontestablement lié aux constants progrès réalisés dans les domaines de la mécanique et de la métallurgie. Il est également lié aux remarquables améliorations apportées aux lubrifiants et aux autres fluides d'automobiles,

¹ Il est à préciser, pour situer l'importance commerciale et économique des lubrifiants, que la consommation mondiale est de 38 millions de tonnes d'huile de base auxquelles s'ajoutent 2,5 à 3 millions de tonne d'additifs divers

tant en ce qui concerne leurs caractéristiques rhéologiques que leur résistance aux diverses agressions chimiques et thermiques engendrées par les conditions d'utilisation de plus en plus contraignantes des véhicules automobiles.

Par ailleurs, les conditions difficiles de circulation des véhicules affectent de plus en plus les lubrifiants notamment avec l'extension du réseau autoroutier (vitesses, charges et températures élevées). Les difficultés croissantes du trafic urbain induisent des phases de fonctionnement à chaud avec parfois une vitesse modérée. Ces conditions de fonctionnement de type "porte-à-porte"(les anglo-saxons parlent de « *stop and go* »), sont d'une extrême sévérité pour l'usure adhésive des organes de distribution.

En vue de réduire la consommation de carburant par la diminution des frottements (favorisée par les lubrifiants) et d'améliorer le démarrage et la mise en action des véhicules à basse température, les constructeurs ont été amenés à préconiser des lubrifiants pour moteurs de plus en plus fluides, en particulier à froid, tout en conservant une viscosité suffisante, à haute température et fort cisaillement, pour protéger les surfaces frottantes d'une usure destructrice, d'où la formulation d'une nouvelle génération d'huiles multigrades à hautes performances.

Pour faire face à ces contraintes, les constructeurs, ont mis au point des lubrifiants qui ont permis d'allonger relativement les intervalles de vidange. Des allongements allant de 20.000 à 60.000 voire 100.000 Km sont aussi envisagés dans les études. Les lubrifiants pour l'automobile sont, de plus en plus, des produits de haute technologie dont la mise au point, longue et complexe, exige un effort de recherche intense et coûteux qui doit sans cesse se renouveler.

Les recherches encore plus étendues portent aussi, sur:

- 1- les caractéristiques des huiles dites « de bases » provenant de l'industrie du raffinage du pétrole et/ou sur l'industrie chimique;
- 2- les performances des additifs élémentaires et les interactions auxquelles ils peuvent conduire une fois assemblés.

Ce présent travail se veut comme une modeste contribution à la recherche d'une éventuelle amélioration de la qualité de deux huiles produites dans une entreprise algérienne.

Notre travail consiste, plus précisément, à étudier la dégradation du lubrifiant en faisant le suivi de deux huiles lubrifiantes pour moteur essence et diesel, respectivement NAFTILIA SUPER 20W50 et CHELIA VP SUPER 20W40, fabriquées par SONATRACH et

commercialisées par NAFTAL, toutes deux sociétés nationales. Ce suivi concerne la surveillance de la dégradation des propriétés physico-chimiques des dites huiles.

Notre question est de savoir comment les caractéristiques des huiles utilisées évoluent en terme de détérioration, dans le temps en fonction du nombre de kilomètres parcourus ?

Le choix des deux lubrifiants NAFTILIA SUPER pour moteur essence et CHELIA VP SUPER pour moteur diesel est motivé par le fait que ces derniers sont les plus vendus par l'entreprise NAFTAL.

Ce travail s'articule sur quatre chapitres:

Le premier chapitre est consacré aux lubrifiants dans le cas général, à leurs caractéristiques, à leurs propriétés et à leur composition. Dans ce chapitre on fera le point sur les quatre types différents de lubrifiants, on détaillera le rôle du lubrifiant, puis on fera l'inventaire des propriétés des lubrifiants et enfin nous discutons la composition des lubrifiants.

Le deuxième chapitre est centré sur le vieillissement et la dégradation du lubrifiant en service. Nous expliquons dans cette partie le vieillissement et la dégradation du lubrifiant et les formes sous lesquelles ils peuvent apparaître. Ensuite on passe en revue les différents modes de suivi de la dégradation des lubrifiants.

Les lubrifiants sont classés selon des organismes internationaux et autres. Cette classification est abordée dans le troisième chapitre.

Le chapitre quatre porte sur la description des techniques expérimentales pour le suivi du vieillissement et la dégradation de cas particulier de lubrifiants automobiles mentionnés plus haut et enfin nous passons à l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale, où nous ferons le bilan de notre étude, et on identifiera les axes de recherches futurs basés sur nos résultats ou nos réflexions

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES LUBRIFIANTS

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES LUBRIFIANTS

INTRODUCTION

Les lubrifiants ont joué et jouent toujours un rôle essentiel dans les systèmes mécaniques. Ils sont connus depuis l'antiquité sous des formes rudimentaires (suif, graisses animales ou végétales, fleur de soufre) mais peu stables dans le temps ou sous les contraintes. L'apparition du pétrole et de ses produits dérivés a révolutionné ce domaine en fournissant, en grande quantité, des produits de base qui possèdent de bonnes caractéristiques lubrifiantes. L'ajout de poudres dopantes à ces bases dès le début du XXème siècle a créé les lubrifiants tels que nous les connaissons actuellement, avec des caractéristiques spécifiques à chaque utilisation.

Le mot « lubrifiant » – du latin lubricus à savoir : glissant – est un « matériau qui, interposé entre les surfaces frottantes d'un mécanisme, oppose une faible résistance au cisaillement et réduit l'usure des pièces en mouvement [3]. Cette définition ne met pas en valeur la totalité des rôles joués par le lubrifiant, comme nous pourrions le constater par la suite.

Dans notre travail, seul le cas des lubrifiants liquides à base minérale, plus communément appelés huiles, sera traité en détail.

Mais avant d'entamer la première partie, voyons la taille du marché mondial des lubrifiants à l'aide du tableau 1.1 qui donne un aperçu général de la consommation, par pays, des lubrifiants et des divers produits pétroliers en 1990 [4].

Tableau 1.1 : Consommation annuelle en 1990 des lubrifiants dans différents pays.

Rang	Pays	Lubrifiants (kg/habitant)	Tous produits pétroliers (kg/habitant)
1	Etats-Unis	33,7	3087
2	Canada	31,4	2607
3	Belgique	27,7	2142
/	/	/	/
11	Japon	17,9	1664
12	France	17,1	1455
13	Danemark	15,0	1689
/	/	/	/
25	Brésil	4,2	443
26	Inde	1,2	70
Moyenne Amérique Nord		33,5	3043
Moyenne CEE		16	1485
Moyenne Monde		7,3	597

Pour ce qui est du secteur français, le marché annuel des lubrifiants en 1996 était de 882 milliers de tonnes. Ce total est l'assemblage d'un grand nombre de produits très divers comme le montre la figure 1.1. Dans cet ensemble, la part de marché des lubrifiants pour l'automobile représente environ 26 %.

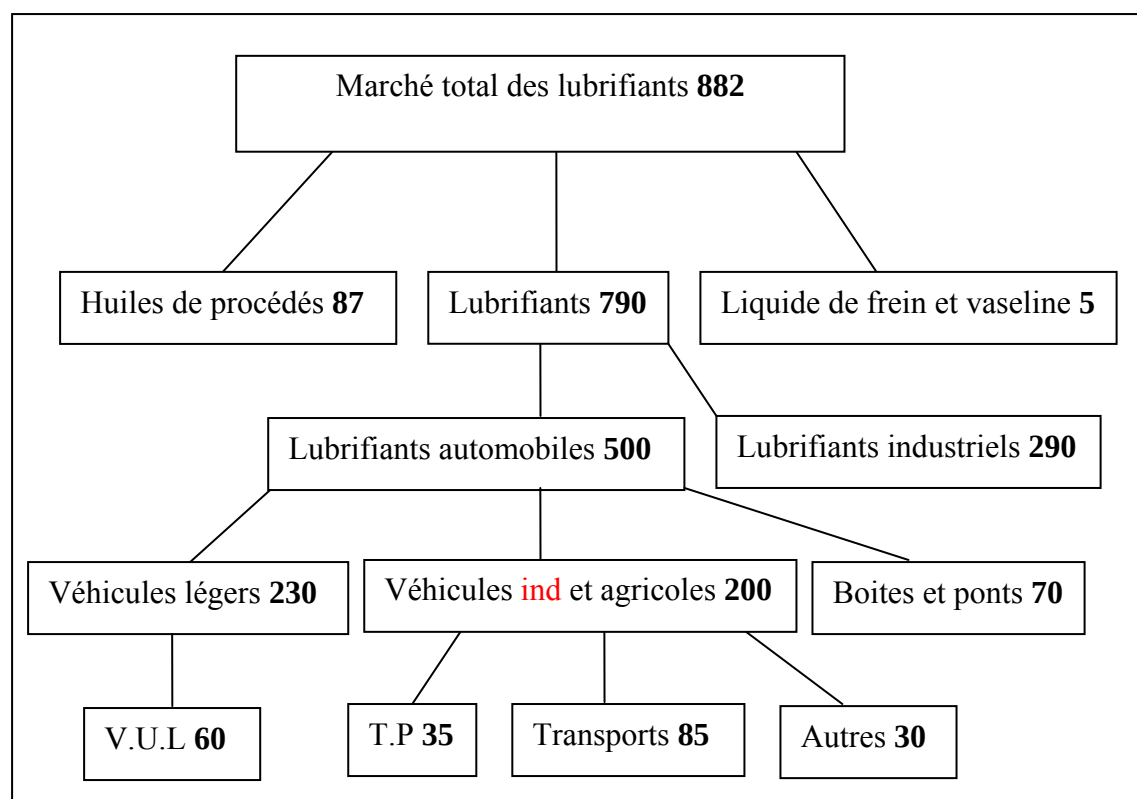


Figure 1.1 : Segmentation du marché "lubrifiants" en France en 1996 (milliers de tonnes)
V.U.L:véhicule utilitaire léger; T.P:véhicules pour travaux publics; ind:industriels

1 LES DIFFERENTS TYPES DE LUBRIFIANTS

Les lubrifiants peuvent se classer en quatre catégories qui sont les produits gazeux, les produits liquides, les produits semi-solides ou plastiques et les produits solides.

1.1 Les lubrifiants gazeux

Ces lubrifiants sont utilisés dans les mécanismes peu chargés et tournant à très grande vitesse tels que les ultracentrifugeuses, les rectifieuses à grande vitesse, les gyroscopes, etc. Ils sont aussi utilisés dans les mécanismes qui fonctionnent à très hautes températures tels que les propulseurs à réaction, les missiles, les fusées, etc. Ces lubrifiants sont donc réservés pour des applications particulières.

L'air est le gaz le plus couramment utilisé, mais de nombreux autres gaz ont été considérés (hydrocarbures halogénés, gaz carbonique, hélium...). Avec les gaz, le coefficient de frottement entre les pièces en mouvement est extrêmement faible, et comme leur viscosité est relativement stable en température, les performances des dispositifs sont elles aussi stables malgré la variation des conditions de fonctionnement (espace, etc.). L'air est le lubrifiant idéal pour les industries alimentaires ou chimiques, là où toute contamination doit être évitée.

1.2 Les lubrifiants liquides

Les lubrifiants liquides sont les plus utilisés. On les retrouve dans les mécanismes chargés tels que les paliers lisses, les butées, les glissières de machine, les moteurs alternatifs, les turbines à vapeur, les engrenages, les chaînes, etc. Le lubrifiant améliore le contact « métal/métal » du mécanisme lubrifié. Mais chaque fois que cela est possible, le lubrifiant permet la séparation des surfaces par l'effet de la portance hydrodynamique et sa caractéristique la plus importante est alors sa viscosité. Parmi les lubrifiants liquides, les huiles minérales d'origine pétrolière sont les plus utilisées.

Cependant, il ne faut pas oublier les huiles d'origine végétale et animale (biodégradabilité, contact alimentaire), l'eau, les émulsions huile-eau ainsi que les huiles synthétiques.

1.3 Les lubrifiants semi-solides

Les lubrifiants semi-solides ou plastiques, utilisés essentiellement dans les graisses, peuvent être des corps gras d'origine animale (suif) ou végétale, des corps gras saponifiés

ou des gels divers. Les savons métalliques les plus employés dans la constitution des graisses, sont à base d'aluminium principalement, puis de calcium, de lithium, de plomb ou de sodium. Les mécanismes, tels que les roulements, les liaisons glissières ou les rotules, les joints et les presse-étoupe, qui équipent les matériels agricoles ou de terrassement ainsi que les matériels ferroviaires, justifient soit un besoin de rétention du lubrifiant soit un besoin de lubrification isolé. C'est dans ces cas-là que les graisses sont utilisées. Dans le travail des métaux, des lubrifiants semi-liquides (émulsions ou dispersions) sont couramment exploités.

1.4 Les lubrifiants solides

Les lubrifiants solides sont réservés aux dispositifs qui travaillent dans des conditions extrêmes, par exemple en eau profonde, hors de l'atmosphère terrestre, dans une pile atomique, etc. Des mécanismes plus courants, tels que les serrures, peuvent aussi être lubrifiés à l'aide de ces lubrifiants solides. Parmi les lubrifiants solides, on peut citer par exemple, le graphite ou le bisulfure de molybdène. Toutefois, avec ces matériaux, les coefficients de frottement sont généralement plus élevés qu'avec les huiles. De plus, ils peuvent présenter des problèmes d'accrochage aux surfaces et les produits de décomposition peuvent être corrosifs.

2 LES ROLES DU LUBRIFIANT

Les rôles premiers du lubrifiant sont donnés dans sa définition : " le lubrifiant doit opposer une faible résistance au cisaillement et réduire l'usure des pièces en mouvement". La réalité est toutefois nettement plus complexe. A vrai dire, cette définition très macroscopique, recouvre en fait tout un ensemble de fonctions souvent méconnues dont les principales [5] devraient permettre de :

- réduire les pertes d'énergie mécanique (les frottements) ;
- réduire l'usure des organes frottants ;
- protéger les organes contre la corrosion ;
- évacuer la chaleur ;
- évacuer les impuretés. . .

Par exemple, dans le cas du frottement acier sur acier [6]: le coefficient de frottement dynamique passe d'une valeur moyenne de 0,9 dans le cas du frottement sec, à une valeur comprise entre 0,05 et 0,1 avec une lubrification utilisant une huile d'origine animale en régime de lubrification limite (soit un gain d'un facteur 10 à 20); puis à une valeur comprise entre 0,001 et 0,01 avec une lubrification qui utilise une huile d'origine minérale en régime hydrodynamique (soit un gain d'un facteur 100 à 1000); puis finalement à une valeur comprise entre 1.10^{-6} à 1.10^{-3} avec une lubrification qui utilise une huile d'origine minérale en régime de lubrification hydrostatique (soit un gain d'un facteur 10 ou plus).

La réduction de l'usure des organes frottants est obtenue en séparant totalement les organes par un film lubrifiant, ou le cas échéant, en interposant un film de matériau dont la résistance au cisaillement est plus faible que celle des organes.

Le lubrifiant permet aussi de protéger les organes contre la corrosion par l'eau ou par des contaminants acides. Ce rôle est généralement joué par les produits d'addition, ou dopes, appelés couramment " additifs ", qui n'existent pas normalement dans le lubrifiant. Ces additifs sont de natures chimiques diverses : sulfonates de métaux alcalino-terreux (calcium) ou composés phénoliques.

L'évacuation de la chaleur est aussi réalisée par le lubrifiant. Ainsi, dans le cas des moteurs thermiques à combustion interne, le lubrifiant peut évacuer près de 4 % de la chaleur produite par la combustion. Ce rôle, accessoire dans le cas du moteur et significatif dans le cas des transmissions, devient prépondérant dans le cas de la coupe des métaux, car le lubrifiant devient alors l'évacuateur principal des calories dégagées lors du travail de l'outil.

Enfin, l'évacuation des impuretés vers le filtre, où elles seront capturées est aussi une fonction importante du lubrifiant. En effet, de nombreux mécanismes lubrifiés peuvent être endommagés par les impuretés présentes dans le lubrifiant. Pour éviter cela, le lubrifiant se charge des impuretés à l'endroit où elles apparaissent, puis il les garde en suspension pour limiter leur dépôt avant de les relâcher dans le filtre. Dans le cas des moteurs diesel, les suies (voir annexe A) doivent être évacuées de la zone des segments pour éviter le phénomène de gommage.

Pour remplir ces diverses fonctions, le lubrifiant doit posséder de nombreuses caractéristiques qui, malheureusement, ne sont pas toujours compatibles, et qui sont soit apportées par la base lubrifiante soit par les additifs.

2.1 La lubrification des moteurs à combustion interne

Dans le cas des moteurs à combustion interne, l'huile sert à lubrifier et à refroidir tous les composants de l'équipage mobile (pistons, bielles, vilebrequin), à éliminer les impuretés et à neutraliser les produits de combustion chimiquement actifs. L'huile ne peut assumer ces fonctions que si elle est amenée en quantité suffisante aux endroits critiques du moteur et que si ses propriétés (huile de base et additifs) répondent aux besoins. Les caractéristiques demandées au lubrifiant sont globalement les mêmes que celles décrites dans la section précédente. Sont ajoutées à ces dernières, des caractéristiques spécifiques telles que la neutralisation des produits acides ou basiques générés par la combustion, la dispersion des suies dans le cas des moteurs diesel, la résistance aux hautes températures qui apparaissent au niveau des pistons, etc. Étant donné la sollicitation croissante des lubrifiants pour moteur, les lubrifiants synthétiques et semi-synthétiques sont de plus en plus utilisés. Les lubrifiants adaptés à un moteur sont déterminés par le constructeur du moteur au moyen d'une batterie de tests. Dans le domaine automobile, certains de ces tests sont reconnus dans le monde entier. Les critères essentiels sont : le type de moteur (à essence ou diesel, atmosphérique ou turbocompressé), la charge des pièces motrices et des paliers, la température de fonctionnement, la quantité et la nature chimique des résidus de combustion, le volume de remplissage disponible, l'intervalle de vidange espéré, etc. Pour les moteurs diesel, la protection contre les dépôts au niveau des segments du piston revêt une grande importance étant donné le taux de compression très élevé. Le cas des gros moteurs marins est encore plus spécifique. Pour cette application, le lubrifiant est l'élément le plus important pour la pérennité du moteur qui fonctionne environ 5000 heures par an. Ces moteurs consomment des fuels lourds, achetés dans le monde entier selon les escales et la disponibilité, qui contiennent du soufre à des teneurs élevées (de 2 à 5 % en masse). La mauvaise qualité et les caractéristiques très fluctuantes du carburant entraînent le besoin de lubrifiants très spécifiques pour protéger le moteur contre les attaques de l'ambiance saline, des acides soufrés, des dépôts autour des pistons, etc.

L'importance de la lubrification est telle que la fourniture du lubrifiant est systématiquement doublée d'une assistance technique qui permet le suivi des caractéristiques du lubrifiant dans le monde entier. La quantité de lubrifiant utilisée peut atteindre la dizaine de tonnes pour des moteurs super-lents, et elle est un peu plus faible

pour les moteurs lents. L'évolution des caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant n'entraîne pas sa vidange, comme dans le cas des moteurs automobiles : un appoint contenant les additifs nécessaires à la compensation de la perte de caractéristiques est alors effectué.

2.2 La lubrification des transmissions mécaniques

Le rôle prédominant du lubrifiant dans une transmission mécanique est d'éviter l'usure des pignons, des paliers et des roulements, ainsi que d'empêcher les détériorations de surface par grippage et par arrachement de métal. De plus, des caractéristiques "extrême pression" sont nécessaires. Elles permettent un contact non destructeur entre les dents des engrenages sous des contraintes élevées de charge et de glissement.

Le lubrifiant doit aussi permettre d'évacuer la chaleur produite dans la transmission par les différents frottements entre les organes. Le rendement d'une transmission mécanique performante est de l'ordre de 90 %. La puissance perdue étant transformée en chaleur, une transmission dimensionnée pour transmettre 136 kW (soit 100 ch) et ayant un rendement de 90 % produira environ 14 kW de chaleur pure qu'il faut alors évacuer dans l'environnement si l'on ne veut pas courir le risque de détériorer le lubrifiant et la transmission à cause de la température trop élevée. Les transmissions sont des mécanismes qui comportaient des contacts hertziens (roulements et butées, engrenages, cames, etc.) qui engendrent dans le film lubrifiant des pressions pouvant atteindre 10^8 à 10^9 Pa (soit 10^3 à 10^4 bars) selon Lefèvre [7] et Flamand [8]. La durée des contacts peut descendre jusqu'à des valeurs très faibles, de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-5} s, avec un temps de relaxation du lubrifiant soumis aux contraintes d'un contact hertzien de l'ordre de 10^{-7} s. Pendant les contacts, l'augmentation de la pression entraîne une augmentation de la viscosité qui permet de rester dans le régime de lubrification élastohydrodynamique. S'ajoutent à ces caractéristiques spécifiques les caractéristiques plus traditionnelles de tous les lubrifiants qui sont la protection du système lubrifié vis-à-vis de la corrosion, le drainage et l'évacuation des polluants solides ingérés ou générés, etc.

2.3 La lubrification des organes de pression

Enfin, il reste un domaine dans lequel le lubrifiant joue encore un rôle important : il s'agit de la lubrification des pompes et autres organes hydrauliques qui travaillent sous pression. Le liquide transporté joue alors plusieurs rôles : transmetteur de déplacement, d'effort et de puissance, protection des organes contre les agressions et lubrification des organes frottants.

Le lubrifiant doit bien lubrifier les divers éléments de commande du circuit hydraulique, et en particulier les distributeurs sensibles aux phénomènes de collage et de gommage. Le lubrifiant doit aussi posséder de bonnes capacités anti-usure pour limiter la dégradation des pompes utilisées : pompes à engrenages, à barillet ou à pistons. Pour ce qui est des freins, il doit permettre une étanchéité absolue du circuit hydraulique et doit donc être inerte vis-à-vis des élastomères utilisés dans les joints tournants ou fixes. Enfin, il doit répondre aux qualités exigées pour un circuit hydraulique de commande ou de puissance :

- très grande vitesse de réponse (ou délai de réponse court) ;
- grande sensibilité du circuit ;
- insensibilité relative aux variations de températures.

3 LES PROPRIETES DU LUBRIFIANT

Pour répondre aux objectifs fixés par leur utilisation dans les transmissions, dans les moteurs ou dans des circuits hydrauliques, les lubrifiants sont caractérisés par un ensemble de propriétés qui font l'objet de normes de spécifications ou de recommandations dans de nombreux pays.

Les propriétés des lubrifiants peuvent se classer en deux familles : les caractéristiques d'identification et les caractéristiques d'utilisation. Il est à noter que certaines propriétés font partie des deux familles.

Les propriétés d'un lubrifiant peuvent aussi se décliner en fonction de leur nature :

- propriétés **rhéologiques** : viscosité, point d'écoulement, pompabilité, filtrabilité ;
- propriétés **chimiques** : oxydation, acidité et basicité, teneur en additifs, corrosion du fer et des autres métaux, stabilité thermique ;
- propriétés **thermiques** : conductivité thermique, capacité thermique massique, volatilité, point éclair, coefficient de dilatation cubique ;

- propriétés **optiques** : couleur, indice de réfraction ;
- propriétés **superficielles** : solubilité des gaz, moussage, désaération, désémulsion ;
- propriétés **mécaniques** : coefficient de frottement, cisaillement, usure et capacité de charge ;
- propriétés **électriques** : conductivité et résistivité, rigidité diélectrique ;
- propriétés **biologiques** : biodégradabilité ;
- propriétés de **stabilité** au stockage.

Avant de détailler toutes ces propriétés, nous devons rappeler que les méthodes d'analyses qui seront citées par la suite nécessitent toutes d'être effectuées en laboratoire sur des échantillons plus ou moins importants de lubrifiant.

3.1 Les propriétés rhéologiques

Dans les propriétés rhéologiques se trouvent la viscosité et les propriétés qui s'y rattachent plus ou moins directement, c'est-à-dire les relations viscosité-pressure, viscosité-température, ainsi que le point d'écoulement du lubrifiant, sa pompabilité et sa filtrabilité.

3.1.1 Viscosité

La viscosité est la caractéristique la plus importante pour un lubrifiant liquide car c'est d'elle que va dépendre la résistance du film lubrifiant qui protège les pièces en mouvement pour des conditions de fonctionnement données.

Si un liquide homogène, dont la masse volumique est supposée constante est soumis à des déformations telles que des glissements et des cisaillements, alors il leur oppose une résistance mesurable. Les liquides visqueux sont intéressants car la résistance F qui se manifeste est une fonction croissante de la vitesse de glissement, qui s'annule si le liquide est au repos. Cette force F résulte de la résistance qu'opposent les molécules du liquide à une action qui tend à les déplacer.

Soit dans ce liquide un élément d'aire $dA = dx.dy$ (figure 1.2) qui glisse sous l'effet d'une force F_y avec une vitesse V_y , parallèlement à un plan du même liquide distant de dz .

Soit $\dot{\gamma} = \frac{dV_y}{dz}$ le gradient de vitesse entre la surface et le plan, appelé aussi vitesse de cisaillement. Soit $\tau = \frac{dF_y}{dA}$ la contrainte de cisaillement.

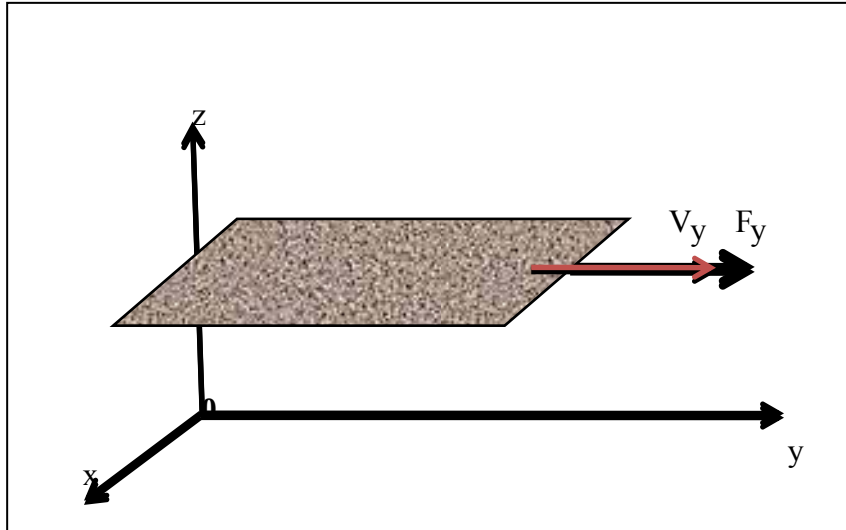


Figure 1.2: Ecoulement sur un plan

Si le gradient de vitesse est assez faible pour que la relation entre ces deux grandeurs soit linéaire, alors il suffit d'écrire que la force motrice agissant sur l'élément dA égale la force de frottement visqueux pour obtenir la loi de Newton.

$$\frac{dF_y}{dA} = \mu \frac{dV_y}{dz}$$

avec: $\tau = \mu \dot{\gamma}$, où μ est par définition le coefficient de viscosité dynamique appelé aussi plus simplement viscosité dynamique. Cette définition n'est valable que dans le cas d'un écoulement laminaire, et seulement pour un fluide newtonien, c'est-à-dire pour un fluide dont la viscosité ne dépend pas de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$. La contrainte de cisaillement est exprimée en $N.m^{-2}$ et la viscosité dynamique est exprimée en Pascal-seconde (Pa.s, équivalent à des $N.m^{-2}.s$).

A la viscosité dynamique s'ajoute la viscosité cinématique ν . Elle est le quotient de μ par la masse volumique ρ du fluide à la même température. L'unité de la viscosité cinématique est alors le $m^2.s^{-1}$.

Dans les cas les plus courants, la viscosité d'un lubrifiant est donnée à deux températures, respectivement 40° et 100°C, à pression normale et à faible taux de cisaillement. Il faut noter que les lubrifiants multigrades sont assimilés à un fluide newtonien bien que leur viscosité varie légèrement avec le taux de cisaillement. Cette variation est due à la présence d'additifs bien particuliers. La viscosité peut être déterminée à l'aide de nombreuses méthodes de laboratoire qui utilisent soit un viscosimètre à tube capillaire (ASTM D 445, D 4624 ou ISO 3104, ISO 3105 ou NF T 60-100), soit un viscosimètre rotatif (ASTM D 2602 pour le Cold Cranking Simulator ou CCS, D 3829, D 4684, D 2983 et D 5133 pour le viscosimètre Brookfield, D 4683).

Il faudra aussi noter que la viscosité, qui est une caractéristique très importante pour un lubrifiant, dépend fortement de la température et un peu moins de la pression.

La relation viscosité-température

Le principe général est que la viscosité diminue lorsque la température augmente. Ceci s'explique physiquement par l'augmentation des vibrations des molécules et par la diminution des interactions lorsque la température augmente au sein du lubrifiant. La relation traduisant ce phénomène physique la plus utilisée est celle de Mac Coull et Walther [9, 10, 11].

Cette relation permet de calculer la viscosité en fonction de la température et des caractéristiques du lubrifiant.

$$\log_{10} [\log_{10} (v + a)] = m \log_{10} T + b$$

avec :

v : la viscosité cinématique (mm²/s) ;

T : la température en Kelvin (K) ;

a : un coefficient variant entre 0,6 et 0,8 selon la valeur de v (source ASTM) ;

b et m : sont des constantes caractéristiques de l'huile ($|m|$ est appelé indice de pente et m coefficient de pente, m étant négatif).

En règle générale, les huiles fluides ont un meilleur comportement viscosité-température que les huiles visqueuses, ce qui restreint l'intérêt de l'indice de pente $|m|$. De plus dès que le lubrifiant contient des additifs qui servent à modifier la viscosité à froid ou à chaud, cette formule devient moins précise.

Afin de pallier à cet inconvénient, Dean et Davis [9] ont imaginé un indice de viscosité (I.V) en se référant à deux gammes d'huiles étalons (H et L) allant des plus fluides aux plus visqueuses. La gamme de type paraffinique (H) provenant d'un brut de Pennsylvanie et ayant un bon comportement viscosité-température (c'est à dire une faible variation de la viscosité en fonction de la température) a, par définition, un indice de viscosité de 100. La gamme de type naphénique (L) ayant un mauvais comportement viscosité-température a par définition, un indice de 0 (figure 1.3). Cet indice est un nombre qui caractérise la variation de la viscosité en fonction de la température, dans une échelle conventionnelle. L'indice de viscosité inférieur à 100 d'un lubrifiant se calcule à l'aide de la formule générale :

$$IV = \frac{(L - U)}{(L - H)} \times 100$$

avec:

U : la viscosité à 40°C du lubrifiant ;

L : la viscosité à 40°C d'une huile d'indice 0 ayant la même viscosité à 100°C que le lubrifiant (tirée d'une table) ;

H : la viscosité à 40°C d'une huile d'indice 100 ayant la même viscosité à 100°C que le lubrifiant (tirée d'une table).

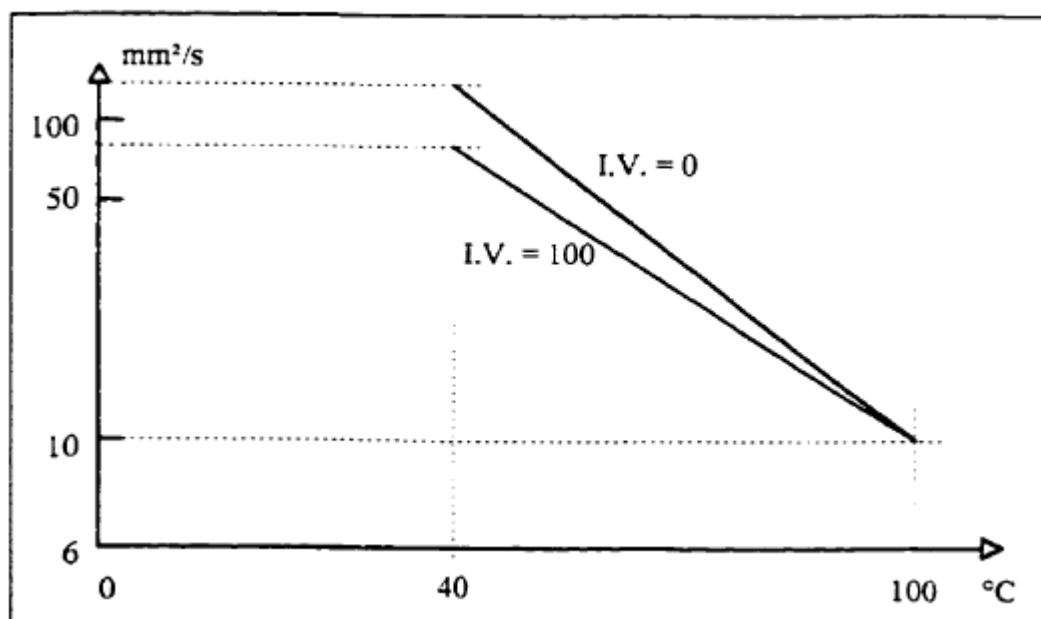


Figure 1.3 : Courbe viscosité-température pour deux huiles d'indice de viscosité 0 et 100

Par définition, cette formule ne convient qu'à des indices de viscosité inférieurs à 100. Or, depuis sa création, sont apparus de nombreux lubrifiants avec des indices de viscosité supérieurs à 100, indices dus à la présence de polymères modificateurs de viscosité. L'avantage principal de ces lubrifiants est que leur variation de viscosité est très faible lorsque la température est modifiée. Cette situation a entraîné l'apparition d'une nouvelle loi de calcul de l'indice de viscosité, mais empirique cette fois-ci :

$$I.V = \frac{\text{anti log } N - 1}{0,00715} + 100$$

$$\text{Avec } N = \frac{\log H - \log U}{\log Y} ;$$

Y la viscosité à 100°C en mm².s⁻¹ du lubrifiant,

3.1.2 Point d'écoulement

Le point d'écoulement est un phénomène de visco-température. Il peut être défini comme étant la plus basse température à laquelle le lubrifiant peut encore couler lorsqu'elle est refroidie sous certaines conditions définies. À cette température, le lubrifiant est pâteux car les cristaux de paraffine qui se sont formés s'accrochent entre eux. Il n'est donc pas totalement fluide. Si on poursuit le refroidissement, l'écoulement n'est plus possible. Cette caractéristique limite l'utilisation des lubrifiants dans le domaine des basses températures mais elle peut être améliorée par l'utilisation d'additifs.

La méthode NF T 60-105, ainsi que la méthode ASTM D 97 illustrent les méthodes de laboratoire qui permettent de mesurer le point d'écoulement.

3.1.3 Pompabilité

La pompabilité est une caractéristique généralement exigée des lubrifiants pour moteurs. La connaissance du point d'écoulement ne permet pas, à elle seule, de savoir à partir de quelle température le lubrifiant sera pompable et transportable dans le dispositif à lubrifier (par exemple lors d'un démarrage à froid d'un moteur, le lubrifiant étant alors encore très visqueux). Arbitrairement, la SAE a situé pour les moteurs la température limite de pompabilité du lubrifiant à 5°C en dessous de la température limite de démarrage (SAE J300d).

3.1.4 Filtrabilité

Afin de conserver au fluide un niveau correct de propreté en service, un système de filtration du lubrifiant est monté sur le circuit hydraulique. Cependant, aux basses températures, le lubrifiant peut contenir des cristaux de paraffine susceptibles de perturber son écoulement. Si ces cristaux sont arrêtés par les filtres, ceci entraîne, à plus ou moins long terme, le colmatage temporaire ou non du filtre. Il est donc primordial que le lubrifiant présente une bonne aptitude à être filtré à basse température sans provoquer le colmatage des milieux filtrants. Cette aptitude est appelée " filtrabilité ". Ce colmatage indésirable peut être aggravé par la présence d'eau en faible quantité ou de polluants solides. De plus, il durera tant que la température reste basse.

Parmi les méthodes permettant de quantifier la filtrabilité, citons les méthodes normalisées NF E 48-690 et NF E 48-691, la méthode Denison TP 02 100 ou la méthode Bensch [12].

3.2 Les propriétés de masse

Ces propriétés sont au nombre de deux : la masse volumique et la compressibilité.

3.2.1 Masse volumique

La masse volumique d'un liquide à une température donnée est la masse de l'unité de volume. Pour les produits pétroliers, elle est mesurée à 15°C et exprimée en kg/m³ ou kg/l.

Lorsque la température augmente, l'huile se dilate: donc la masse volumique diminue. Il est possible de calculer la masse volumique à une température donnée T connaissant la masse volumique à une température de référence T à l'aide du coefficient de dilatation cubique de l'huile α .

$$\rho = \frac{\rho_{15}}{1 + \alpha(T - 15)}$$

Pour les huiles minérales, la valeur moyenne de α est de l'ordre de $62 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Klaus [11] donne des valeurs légèrement supérieures mais du même ordre de grandeur (comprises entre 65 et $108 \cdot 10^{-5}$). Elle peut être déterminée à l'aide des méthodes ASTM D 1298, ou de la méthode normalisée NF T 60-101 par exemple.

3.2.2 Compressibilité

Les huiles lubrifiantes sont peu compressibles, mais la connaissance de cette propriété s'avère importante dans les systèmes hydrauliques où le fluide doit transmettre de la puissance avec un minimum de perte et de retard.

En effet, plus un fluide sera compressible et plus les pertes et le retard seront importants, surtout si les pressions sont élevées. La compressibilité des liquides est exprimée par le coefficient de compressibilité χ_θ ou par son inverse le module de compressibilité β .

$$\chi_\theta = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_\theta$$

Le module de compressibilité décroît avec la température et croît avec la pression. C'est une propriété fondamentale du fluide de base qui n'est pas affectée par la présence d'additifs ou de gaz dissous. La compressibilité est plus faible pour les hydrocarbures naphténiques par rapport aux hydrocarbures paraffiniques.

Lorsque le fluide se comprime, la masse volumique et la viscosité augmentent. Cette propriété est essentiellement une propriété d'identification du lubrifiant.

3.3 Les propriétés chimiques

Les propriétés chimiques sont au nombre de cinq. Nous y retrouvons la stabilité à l'oxydation, l'acidité ou la basicité du lubrifiant, la teneur en additifs, l'aptitude à corroder ou non les métaux et la stabilité thermique du lubrifiant.

3.3.1 Stabilité à l'oxydation

L'oxydation est un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène. La vitesse des réactions d'oxydation croît avec la température et la concentration en oxygène. Une base universellement admise par les spécialistes est qu'au-delà d'une température donnée (fonction de l'huile de base et additifs), la vitesse double à chaque décade de température. La stabilité d'un lubrifiant en présence d'air ou d'oxygène est donc l'une de ses propriétés fondamentales.

La réaction d'oxydation attaque les radicaux libres présents dans le lubrifiant. Dans les lubrifiants à base minérale, les radicaux libres réagissent avec l'oxygène pour former des

peroxydes qui réagissent ensuite avec les composés hydrocarbonés pour créer de nouveaux radicaux libres et des hydroperoxydes.

La stabilité du lubrifiant durant l'oxydation est obtenue en ajoutant des additifs antioxydants à l'huile de base. Ces additifs agissent au niveau des trois réactions chimiques, soit en inhibant les radicaux libres, soit en ralentissant la décomposition des peroxydes, soit en inhibant les réactions de catalyse des matériaux. L'oxydation d'un lubrifiant est l'une des formes les plus significatives de dégradation des lubrifiants en service et de son suivi.

3.3.2 Indices d'acide (TAN) et de base (TBN)

L'indice d'acide total (Total Acid Number - TAN) est l'expression de la quantité totale de base nécessaire pour neutraliser les constituants acides présents dans un gramme d'huile. De même, l'indice de basicité (Total Base number - TBN) est l'expression de la quantité totale d'acide nécessaire pour neutraliser les constituants à caractère basique fort présents dans un gramme d'huile.

Ces deux indices (TAN et TBN) renseignent sur le niveau de dégradation du lubrifiant.

Notons que la valeur de cet indice d'acide peut être influencée par plusieurs constituants qui sont considérés comme ayant un caractère acide. Il s'agit des acides organiques et minéraux, des composés phénoliques, des sels de métaux autres que les alcalins et de certains agents d'addition (les additifs organo-métalliques essentiellement). Ces constituants peuvent, dans un lubrifiant neuf, entraîner un indice d'acide apparent élevé sans que l'huile ne soit oxydée.

Les méthodes utilisables pour la détermination des indices d'acide ou de base sont, par exemple, la NF T 60-112, ASTM D 974, ISO 6618, ASTM D 664 et ASTM D 2896.

3.3.3 Teneur en additifs

La teneur en additifs est spécifique à chaque lubrifiant, qu'il soit destiné à la lubrification d'un moteur ou d'une transmission. Cette teneur varie en fonction de la fabrication, des particularités exigées des lubrifiants et des caractéristiques intrinsèques de l'huile de base. Ces informations sont tenues secrètes car il s'agit là du savoir-faire du concepteur du lubrifiant.

3.3.4 Corrosion

Le processus de corrosion découle des réactions entre atomes, à la surface du composant, avec les substances propres au fluide, sont incluses les réactions électrochimiques et les attaques chimiques directes de la surface métallique.

Le lubrifiant ne doit donc pas attaquer (par corrosion) les métaux qu'il lubrifie, et doit aussi les protéger contre la corrosion d'origine externe. Dans le premier cas, le lubrifiant ne doit ni dégrader ni détériorer les métaux utilisés. Dans le second cas, le lubrifiant doit protéger les métaux lubrifiés contre la corrosion électrochimique engendrée par la présence d'eau douce, d'eau de mer ou d'acides. La température constitue un facteur d'accélération de la réaction de corrosion. Les principaux métaux qui sont sensibles à cette première forme de corrosion sont le cuivre (Cu) et l'étain (Sn) et l'alliage bronze. Des méthodes normalisées permettent de déterminer qualitativement le degré de corrosion. Pour le cuivre, par exemple, la méthode de corrosion est normalisée sous les références équivalentes AFNOR M 07015, ASTM D 130, D 1275, ISO 2160, ou NF M 07-015.

La corrosion peut aussi être engendrée par la présence d'eau dans le système à lubrifier. Cette eau entraînera la formation de rouille sur les métaux ferreux. Le lubrifiant doit donc posséder des propriétés antirouille pour éviter les conséquences désastreuses de cette présence inévitable. Pour déterminer les propriétés antirouille du lubrifiant, la méthode ASTM D 665 est utilisée.

3.3.5 Stabilité thermique

La stabilité thermique d'un lubrifiant est sa capacité à résister à des modifications moléculaires (rupture ou réarrangement des liaisons moléculaires des constituants du lubrifiant) qui surviennent à hautes températures en l'absence d'oxygène. Ces réactions ne sont dues qu'à l'action de la température et non à la présence d'oxygène. Les premiers seuils de dégradation thermique se situent aux environs de 200°C.

En effet, les liaisons C-C de l'huile de base minérale sont stables jusqu'à environ 350°C, et les additifs les moins stables se dégradent à partir de 200-260 °C [11, 13].

Les changements qui peuvent se produire dans le lubrifiant sont :

- augmentation ou diminution de la viscosité ;
- formation de produits corrosifs ;

- génération de produits insolubles ;
- formation de produits volatils ;
- changement de la coloration ;
- apparition d'odeur (odeur de brûlé).

3.4 Les propriétés thermiques

Les propriétés thermiques sont au nombre de cinq. Nous retrouvons la conductivité thermique, la capacité thermique massique, la volatilité, le point éclair et le coefficient de dilatation cubique.

3.4.1 Conductivité thermique

Les lubrifiants à base d'huile minérale sont de mauvais conducteurs thermiques. Leur conductivité est de l'ordre de 0,12 à 0,15 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ alors que celle de l'eau est environ cinq fois plus grande (0,57 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

De plus, il faut savoir que la conductivité thermique décroît linéairement avec la température d'environ 5 % tous les 100 K [11]. Cette propriété est essentiellement une propriété d'identification du lubrifiant qui est mesurée en laboratoire.

3.4.2 Capacité thermique massique

La capacité thermique massique, ou chaleur massique, des lubrifiants à base minérale est comprise entre 1500 et 2000 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 0°C. Elle augmente linéairement avec la température pour atteindre 2500 à 3400 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 300°C, soit une augmentation d'environ 25 % tous les 100 K.

Cette propriété est essentiellement une propriété d'identification du lubrifiant qui ne peut être mesurée qu'en laboratoire.

3.4.3 Volatilité

La volatilité est souvent exprimée par la perte relative de poids d'un échantillon du lubrifiant sous des conditions de test données. Elle doit être faible dans les conditions normales d'utilisation du lubrifiant (température, pression, aération), et est surtout influencée par la température. Cette caractéristique est inhérente au choix de l'huile de

base et ne peut pas être améliorée par l'utilisation d'additifs. C'est donc essentiellement une propriété d'identification du lubrifiant.

3.4.4 Point éclair

Le point éclair caractérise la teneur en fractions légères du lubrifiant. L'essai de détermination du point éclair consiste à chauffer, dans un creuset ouvert ou fermé, l'huile jusqu'à ce qu'une petite quantité suffisante d'éléments volatils passe en phase vapeur et peut être enflammée par une petite flamme placée au bord du creuset. Dès que l'explosion se produit avec l'éclair (flash), on note cette température qui correspond au point éclair (flash point). Si on continue à chauffer, la flamme devient stable; c'est le point d'inflammabilité (fire point).

Les méthodes normalisées NF T 60-118, ASTM D 92 et la norme ISO 2592 permettent sa détermination.

3.5 Les propriétés optiques

La couleur et l'indice de réfraction sont les propriétés optiques du lubrifiant.

3.5.1 Couleur

Elle est repérée par comparaison avec des verres étalons de la norme W T 60-104 conforme à l'échelle des couleurs de la ASTM D 1544 NPA.

Lors de leur utilisation, les lubrifiants s'altèrent et deviennent de plus en plus foncés. Le cas est flagrant avec les huiles pour moteurs diesel où les suies donnent au lubrifiant une teinte noire. Une coloration rapide du lubrifiant indique une pollution extérieure ou un début d'oxydation. Une coloration sans changement significatif de l'indice d'acide indique seulement une pollution du lubrifiant. Cette propriété est à traiter au cas par cas, étant donné que certains additifs peuvent modifier la couleur originelle du lubrifiant donnée par l'huile de base.

3.5.2 Indice de réfraction

L'indice de réfraction est le rapport des vitesses de transmission dans le vide et dans le lubrifiant d'une radiation monochromatique donnée. La radiation généralement utilisée est la raie D du sodium. L'indice de réfraction à 20°C est noté n_D^{20} .

Pour les huiles minérales, il est compris entre 1,47 et 1,55. Cet indice, associé à la masse volumique et à la masse moléculaire moyenne, permet de déterminer la répartition moyenne des carbones de l'huile (carbones paraffiniques, naphéniques et aromatiques). Il est possible d'utiliser les méthodes ASTM D 1218 et D 1747 pour le déterminer.

3.6 Les propriétés superficielles

Les propriétés superficielles sont au nombre de quatre. Trois sont relatives à l'air, la quatrième étant relative à l'eau. La présence d'air dans un circuit hydraulique entraîne toujours de graves perturbations qui sont : la compressibilité du mélange air-fluide, les défauts de lubrification, la cavitation, l'augmentation de l'oxydation du lubrifiant ainsi que l'augmentation de la température due à la compressibilité du mélange. Pour éviter cela, le fluide doit posséder une faible solubilité aux gaz, une faible aptitude au moussage et une bonne désaération.

Comme nous l'avons vu précédemment, la présence d'eau dans un circuit hydraulique est aussi néfaste au bon fonctionnement des organes. Le lubrifiant doit donc posséder une bonne capacité de désémulsion afin d'éviter de capter en permanence ce polluant liquide.

3.6.1 Solubilité des gaz

La solubilité des gaz dans le lubrifiant est une propriété physique qui affecte d'autres propriétés ou caractéristiques telles que la viscosité, le moussage, la compressibilité, la cavitation, le transfert de chaleur, l'oxydation, etc. Dans le cas général, un gaz peut se dissoudre dans le lubrifiant lorsque l'ensemble «lubrifiant/gaz» subit de fortes pressions.

Lorsque cet ensemble revient à une pression plus faible, le gaz reprend sa forme originelle en produisant des bulles dans le lubrifiant. Si les bulles se regroupent, il y aura alors formation de mousse. Par ailleurs, si le gaz dissout contient de l'oxygène, celui-ci pourra réagir avec le lubrifiant en oxydant ce dernier lorsque la température le permettra.

3.6.2 Désaération

La présence d'air dans un circuit de graissage entraîne toujours de graves perturbations: échauffement et oxydation, diminution du pouvoir lubrifiant, érosion par cavitation. La dégradation en service du lubrifiant par oxydation, pollution par l'eau ou par des contaminants solides, détériore la capacité de désaération des huiles. La capacité de

désaération du lubrifiant permet de quantifier le temps nécessaire pour retrouver des conditions normales de fonctionnement. Il est possible d'utiliser, en laboratoire, la méthode normalisée NF T 60-149 pour déterminer le temps de désaération.

3.6.3 Moussage

Le moussage est la conséquence d'une désaération trop rapide, avec accumulation et empilement des bulles d'air de grandes dimensions à la surface de l'huile. La propriété anti-mousse a pour objet d'éviter la formation de mousse au niveau de l'interface liquide-air. En effet, celle-ci crée des risques de débordement ou de réaspiration d'air qui entraînent des perturbations. Après raffinage, l'huile de base a une très faible tendance au moussage. Ce sont essentiellement les additifs (détergent, antirouille) et/ou la contamination qui détériorent cette propriété. De ce fait, des additifs anti-mousse sont nécessaires pour rendre au lubrifiant ses caractéristiques d'origine. L'additif anti-mousse possède une tension superficielle plus faible que celle du lubrifiant permettant de faire éclater plus facilement les parois des bulles dès qu'il s'y trouve.

Ces propriétés sont mesurées par l'essai qui consiste à souffler de l'air dans l'huile à l'aide d'une boule poreuse et à mesurer le volume et la persistance de la mousse formée à différentes températures. Les méthodes normalisées suivantes sont utilisées : NF T 60-129, ASTM D 892, D 3519, D 360 11-1, et ISO 6247 [12, 14].

3.6.4 Désémulsion

La désémulsion d'un lubrifiant est sa faculté à se séparer facilement d'un second liquide, (l'eau par exemple), avec lequel il est mélangé, sans former d'émulsion stable. Cette propriété permet d'évacuer à peu près complètement le liquide contaminant par décantation.

La désémulsion des lubrifiants est mesurée par l'essai qui consiste à agiter un mélange formé de volumes égaux de lubrifiant et d'eau et à mesurer le temps de séparation total ou partiel des deux liquides. Les normes utilisées sont enregistrées par exemple sous les références NF T 60-125, ASTM D 1401 ou ASTM D 2711 [12, 14]. Ces méthodes sont essentiellement utilisées pour caractériser un lubrifiant neuf. Les résultats peuvent être dégradés dans la réalité par la présence de contaminants liquides ou solides.

3.7 Les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont au nombre de trois. Il s'agit du coefficient de frottement, des capacités anti-usure, ou capacité de charge, et du cisaillement.

3.7.1 Coefficient de frottement

Les coefficients de frottement statique et dynamique d'un lubrifiant sont généralement différents. De plus, les demandes des utilisateurs peuvent être de deux natures : avoir le coefficient de frottement statique plus élevé que le coefficient de frottement dynamique, ou inversement. Le premier cas est typique aux véhicules à transmission automatique de type Ford alors que le second cas s'applique aux véhicules à transmission automatique de type General Motors

Cette caractéristique donnera pour les premiers véhicules des passages de vitesses qui se termineront sèchement, alors que pour les seconds, le passage sera très doux et presque insensible en phase terminale. Les méthodes utilisées pour mesurer les propriétés sont généralement propres à chaque constructeur ou à chaque organisme (SAE, Ford, G.M, etc.).

De plus, il ne faut pas oublier l'effet des additifs sur les propriétés de friction du lubrifiant. Hopkins et Anderson ont analysé l'effet d'un certain nombre d'additifs sur les coefficients de frottement statique et dynamique des lubrifiants, pour comprendre la complexité des effets mutuels des additifs [15].

3.7.2 Capacité anti-usure

Elle est liée essentiellement à l'aptitude des lubrifiants à protéger les surfaces métalliques contre les détériorations d'origine adhésive. La propriété anti-usure du lubrifiant est devenue une des propriétés fondamentales des lubrifiants hydrauliques modernes. Elle lui est conférée par son huile de base et les nombreux additifs qui y sont incorporés. L'huile de base intervient lorsque les conditions de fonctionnement permettent l'établissement d'un film protecteur qui empêche le contact direct au niveau des aspérités des deux pièces lubrifiées. Les additifs agissent lorsque le film lubrifiant ne peut plus se former. Ils limitent l'endommagement des pièces en formant, à échelle microscopique, une couche protectrice à même d'empêcher la formation de micro-grippages sur le métal à protéger.

Cette couche est générée par les réactions chimiques entre la surface de la pièce et les additifs.

3.7.3 Résistance au cisaillement

Elle concerne les huiles renfermant des polymères (huiles moteurs et huiles de transmission multigrades). L'aptitude d'un lubrifiant à résister au cisaillement lui permet de garantir des caractéristiques stables durant toute sa vie. Le cisaillement du lubrifiant se produit généralement lors de l'engrènement de deux pignons, ou au passage du fluide dans une restriction sévère, ou lors de l'écrasement du lubrifiant entre les parties mobiles et fixes des roulements et butées.

L'huile de base utilisée dans la composition des lubrifiants possède une très bonne résistance au cisaillement. Cependant, certains additifs ne possèdent pas cette même qualité. Il s'agit tout particulièrement des améliorants de viscosité qui permettent de rehausser l'indice de viscosité (I.V.) du lubrifiant. En effet, dans l'état actuel de la technique, le raffinage permet d'obtenir des huiles de base avec un indice de viscosité naturel compris entre 95 et 105. Si l'on désire obtenir un indice de viscosité plus élevé pour le lubrifiant, il est nécessaire d'introduire un additif appelé « améliorant d'indice de viscosité » qui est souvent un polymère à longues chaînes. Paradoxalement, la présence d'un tel additif entraîne la diminution temporaire de la viscosité du fluide sous l'effet d'un fort cisaillement. Dans ce cas, les molécules de l'additif vont s'aligner dans le sens du mouvement en minimisant leur résistance à l'écoulement. D'autre part, ce cisaillement provoque la dégradation mécanique irréversible de l'additif. Cette dégradation entraîne une baisse permanente de la viscosité et de son indice de viscosité. La dégradation se traduit physiquement par la rupture de la chaîne moléculaire du polymère. Cave et Michael [16] signalent, par exemple, que le gain en viscosité apporté par cet additif peut diminuer de plus de 70 % après environ 500 heures d'utilisation du lubrifiant.

Trois principes différents régissent la détermination de la résistance des lubrifiants au cisaillement. Le premier est le cisaillement hydraulique du lubrifiant au travers d'un injecteur : ASTM D 3945, CEC L-14-A-88 ou DIN 51382 [17]. Le second est le cisaillement mécanique du lubrifiant entre les dents de deux engrenages. Pour ceci, il est possible d'utiliser le montage du test FZG décrit dans la méthode DIN 51354. Le troisième est le cisaillement mécanique du lubrifiant entre les éléments tournants (billes ou rouleaux) et la bague d'un roulement.

3.8 Les propriétés électriques

Ce sont des propriétés utiles dans le cas des huiles utilisées dans les transformateurs, les disjoncteurs, pour les câbles et les condensateurs. Dans ces applications, l'huile sert surtout d'agent évacuateur de chaleur

3.8.1 Conductivité et résistivité

La conductivité est l'inverse de la résistivité. Elle correspond à la quantité d'électricité que l'on peut faire transférer par unité de surface d'un corps donné soumis à un gradient de tension. Les huiles de base et les huiles synthétiques pures ont généralement une très faible conductivité, ce qui est une garantie contre les courts-circuits et les corrosions électrolytiques.

La conductivité des huiles de base minérales et synthétiques est de l'ordre de $10^{-14} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ pour des huiles neuves et sans eau. Cette conductivité peut augmenter pour atteindre $10^{-8} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ si le lubrifiant est contaminé par de l'eau ou s'il est dégradé [18].

Dans le cas des lubrifiants pour moteurs, les additifs détergents et dispersants multiplient par 10^3 à 10^4 la conductivité naturelle de l'huile de base [9]. Les lubrifiants pour moteur peuvent avoir une conductivité de l'ordre de $10^{-9} \Omega^{-1} .\text{cm}^{-1}$ [19].

3.8.2 Rigidité diélectrique

C'est la tension (voltage) la plus élevée sous laquelle une certaine épaisseur d'huile peut être traversée par un arc électrique entre deux électrodes métalliques. Cette tension est appelée "tension de claquage".

A l'état pur, une huile minérale est un très mauvais conducteur. Mais la présence d'eau en très faible quantité (100 ppm ou 0,01 %) réduit fortement la rigidité diélectrique de l'huile. Il en est de même avec la présence de boues (voir annexe A), de poussières, etc. De plus, la rigidité diélectrique des lubrifiants varie selon la nature de l'huile de base, les additifs, etc.

3.9 Autres propriétés

Parmi les autres propriétés que les lubrifiants doivent posséder, on peut citer la stabilité au stockage et la biodégradabilité. La première permet au lubrifiant de conserver ses

qualités depuis sa fabrication jusqu'à son utilisation (pouvant se produire après un délai de stockage plus ou moins long chez le vendeur ou l'utilisateur).

La seconde est de plus en plus d'actualité, car il faut tenir compte de l'incidence du lubrifiant usagé sur l'environnement. Après son usage et sa récupération, il est possible de le recycler ou de l'utiliser comme combustible afin de ne pas le jeter dans la nature. Mais dans le cas des fuites, ces dispositions ne peuvent se réaliser.

4 LA COMPOSITION DES LUBRIFIANTS LIQUIDES

Lorsqu'on parle d'un lubrifiant liquide, on ne parle pas d'un liquide mono composant. Le lubrifiant est en effet constitué d'une huile de base, dans une proportion comprise entre 60 et 95 %, et de dopes ou additifs qui en complètent la composition. En effet, les moteurs actuels exigent du lubrifiant de nouvelles caractéristiques que l'huile pure ne peut posséder. Il est donc nécessaire d'y ajouter d'autres éléments ou agents qui apportent, chacun à sa manière, les propriétés désirées (anti-usure, antioxydant, extrême pression, etc...). La formulation du mélange est une "recette" longuement étudiée en laboratoire et gardée secrète.

4.1 L'huile de base

Les bases utilisées pour formuler les lubrifiants liquides sont normalement des bases d'origine minérale ou synthétique, mais, pour des besoins très spécifiques, des bases d'origine végétale peuvent aussi être utilisées. Les bases minérales sont issues du pétrole et les bases synthétiques sont fabriquées à partir d'huiles pétrolières ou végétales en fonction des besoins à satisfaire.

Les bases minérales sont obtenues par raffinage de sélection de pétrole brut. La sélection du brut influence fortement les caractéristiques obtenues. Les huiles minérales se composent de nombreux hydrocarbures de structures chimiques diverses. Selon le type de structure dominante, nous sommes en présence d'huile à base mixte, à base paraffinique, à base naphénique ou à base aromatique.

Les bruts les plus favorables sont les paraffiniques (hydrocarbures acycliques saturés). De formule générale C_nH_{2n+2} qui donnent un indice de viscosité élevé. Les bruts naphéniques (hydrocarbures cycliques saturés) donnent des huiles de base à faible indice de viscosité contenant peu de cire, et ayant un très faible point d'écoulement.

Tout l'art du pétrolier consiste à sélectionner et identifier les différents bruts, à les raffiner en éliminant les produits indésirables puis, à mélanger les huiles obtenues en fonction des caractéristiques demandées et des additifs incorporés.

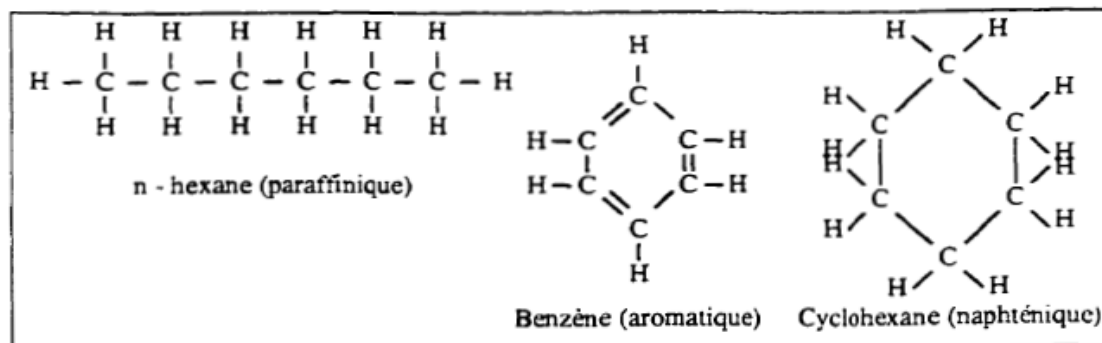


Figure 1.4: Hydrocarbures classiques [20]

De plus, les huiles minérales contiennent, un grand nombre de composants tels que du soufre, de l'oxygène, des traces de métaux, mais en très faible quantité. Une huile de base pure bien raffinée possède un indice d'acide originel (TAN) qui dépasse rarement la valeur de 0,1.

Les huiles synthétiques sont élaborées en fonction des objectifs à atteindre. Les familles les plus courantes sont les polyalphaoléfines, les polyisobutènes, les esters et les polyalkylènes-glycols.

L'inconvénient majeur des huiles synthétiques est leurs prix nettement plus élevés et leurs faibles tonnages de production. De plus, certaines huiles synthétiques ne sont pas du tout miscibles aux huiles minérales.

4.2 Les additifs

Le lubrifiant moderne est un produit de grande technicité contenant de 15% à 20% en poids d'additifs divers qui permettent au moteur de fonctionner dans des conditions de plus en plus sévères.

L'emploi des additifs débute lorsque l'on constate l'impossibilité d'améliorer par des procédés de raffinage, mêmes complexes, les propriétés des produits dérivés du pétrole. En 1936, l'introduction d'additifs détergents dans les huiles de certains types de moteurs

diesel aux conditions d'exploitation très sévères permet de prévenir le gommage des segments et de réduire, substantiellement, l'usure des moteurs [21].

Les additifs sont commercialisés par des sociétés spécialisées dont la plupart dépendent de grands pétroliers internationaux ou de sociétés de produits chimiques. Ils se présentent soit sous forme d'additifs élémentaires soit, surtout sous forme de mélanges d'additifs, parfois plus de quinze, désignés par « paquet d'additifs », « additifs de performance » ou « package ». Parfois, en plus du paquet, le fabricant ajoute à l'huile de base des additifs supplémentaires exerçant chacun une ou plusieurs actions spécifiques.

Le développement d'un paquet d'additifs est une opération longue et coûteuse et le marché de ces produits - de l'ordre de 10 milliards de dollars en 1992 - est important [22], et dominé par quelques sociétés.

L'additif sera spécifiquement choisi en fonction des conditions de service rencontrées (tableau 1.2) et des caractéristiques de l'huile de base. De plus, pour éviter les effets antagonistes dus à leurs fortes interactions, les additifs doivent être choisis en fonction de leur compatibilité avec les composants du lubrifiant. La composition d'un nouveau lubrifiant est donc un compromis qui nécessite une parfaite connaissance de tous les constituants et de leurs interactions.

Tableau 1.2 : domaines et fréquences d'utilisation des additifs.

Caractéristiques	Moteur	Transmission automatique	Transmission manuelle
Anti-usure	■	■	■
Extrême pression	■	■	■
Inhibiteur de corrosion	■	■	■
Détergent	■	■	■
Dispersant	■	■	■
Anti-mousse	■	■	■
Anti-oxydant	■	■	■
Anti-rouille	■	■	■
Améliorant de point d'écoulement	■	■	■
Modificateur de viscosité	■	■	■

Légende: Utilisation fréquente ■ Utilisation occasionnelle ■ Utilisation rare □

Les additifs peuvent être classés en additifs de protection ou en additifs améliorant les performances. La nature chimique des additifs est mentionnée et détaillée dans les travaux de O'Brien [23].

4.2.1 Les additifs de protection

4.2.1.1 Les additifs anti-usure

L'objectif est de réduire les frottements et l'usure pour prévenir l'arrachage de matières et le grippage. Une réaction chimique, entre l'additif et la surface métallique à protéger forme un film facilement cisailable qui empêche les contacts métal contre métal et l'usure. Ce groupe d'additifs comprend les huiles végétales et animales, les acides gras, les esters et les savons métalliques (Pb, Cu, Zn).

4.2.1.2 Les additifs extrême pression

Les additifs extrême pression, comme leur nom l'indique, interviennent pour des contacts «métal / métal» à des pressions extrêmement élevées et à hautes températures. Ce groupe d'additifs réunit les composés chlorés, soufrés, phosphorés, phosphochlorés, sulfochlorés, phosphosoufrés et autres. Ces composés libèrent l'halogène sous l'effet de la température et de la pression, ce qui permet la formation de pellicules plastiques autoréparatrices qui s'interposent entre les parties métalliques, évitant ainsi l'usure de ces dernières.

4.2.1.3 Les additifs inhibiteurs de corrosion

Ils assurent la protection des métaux contre les différentes formes de corrosion par adsorption préférentielle sur les surfaces ou par neutralisation des acides corrosifs. Ce sont des sulfonâtes plus ou moins alcalins de métaux alcalino-terreux.

4.2.1.4 Les additifs détergents

L'objectif est de garder les surfaces chaudes propres et exemptes de dépôts, principalement les pistons et les segments dans le cas des moteurs. Pour ce faire, l'additif réagit avec les éléments constitutifs des boues et dépôts afin de les neutraliser et les garder en suspension soluble dans le lubrifiant. La présence de ces additifs peut entraîner une augmentation de l'indice d'acide du lubrifiant (TAN), ce qui n'est pas sans poser des problèmes lorsqu'on veut déterminer si le lubrifiant est détérioré ou non.

4.2.1.5 Les additifs dispersants

L'objectif est de garder les contaminants non solubles en suspension et dispersés dans le lubrifiant pour éviter les dépôts sous forme de boues. Leur fonction est proche de celle des détergents mais ils agissent de préférence sur les surfaces froides, par exemple le fond du carter des transmissions.

4.2.1.6 Les additifs anti-mousses

L'objectif de leur utilisation est de limiter l'apparition de mousse et d'éviter la stabilité de cette dernière afin d'empêcher le désamorçage de pompe ou le débordement du carter. Les additifs anti-mousses agissent sur la tension superficielle du lubrifiant en la réduisant. Ceci permet alors un meilleur éclatement des bulles.

Ces additifs sont habituellement utilisés dans les lubrifiants pour moteurs et transmissions automatiques et manuelles.

4.2.1.7 Les additifs anti-oxydants

Ils agissent sur la principale cause de dégradation du lubrifiant en retardant la chaîne des réactions d'oxydation. Ces additifs empêchent ou retardent l'action de l'oxygène sur le lubrifiant, action qui entraîne une augmentation de la viscosité, la formation de dépôts et l'augmentation de l'acidité du lubrifiant.

Ces additifs sont habituellement présents dans tous les lubrifiants utilisés dans le domaine automobile. Le dithiophosphate de zinc (DTPZn) est l'un des additifs les plus couramment utilisés car il possède non seulement des propriétés d'antioxydant, mais aussi d'anti-usure, d'extrême pression et d'anticorrosion.

4.2.2 Les additifs améliorant les caractéristiques

4.2.2.1 Les additifs améliorant le point d'écoulement

L'objectif est de rendre le lubrifiant fluide aux basses températures. Cet additif n'empêche pas la formation de cristaux de paraffine à basses températures, mais il entrave leur croissance pour qu'ils conservent une taille microscopique et ainsi préservent la fluidité

du lubrifiant. Les additifs améliorant le point d'écoulement, généralement des polymères, sont habituellement présents dans tous les lubrifiants utilisés dans le domaine automobile.

4.2.2.2 Les additifs modificateurs de viscosité (ou additifs épaississants)

Un lubrifiant doit être caractérisé par sa viscosité à basse température (-18°C) pour rendre compte de son comportement lors du démarrage par temps froid et par sa viscosité à température élevée (100°C). Les valeurs de ces 2 viscosités sont la base de la classification SAE.

L'objectif est de réduire la variation de la viscosité avec la température, qui se traduit par une augmentation de l'indice de viscosité. Le lubrifiant possède alors un caractère multigrade. L'additif, un polymère à longue chaîne, gonfle lorsque la température augmente et contrarie le déplacement des molécules du lubrifiant.

Ces additifs sont habituellement utilisés dans les lubrifiants pour moteurs et transmissions automatiques.

4.2.2.3 Les additifs de compatibilité des joints

L'objectif est de réduire les variations dimensionnelles et les caractéristiques des joints en contact avec le lubrifiant. L'additif réagit avec les joints en créant un très léger gonflement, qui est toléré, tout en empêchant les réactions entre les autres composants du lubrifiant et les joints. Ces additifs sont habituellement présents dans tous les lubrifiants utilisés dans le domaine automobile.

4.2.2.4 Autres caractéristiques

La littérature spécialisée dans le domaine de la lubrification et des lubrifiants renferme un très grand nombre de données sur les caractéristiques des lubrifiants. Nous en avons retenu les plus pertinents pour notre étude, mais on peut se référer à [18, 24, 25] pour de plus amples détails.

Nous venons de voir successivement tout au long de ce premier chapitre les différents types de lubrifiants, les rôles qu'ils jouent dans les moteurs ainsi que leurs propriétés intrinsèques de nature variée (rhéologique, mécanique, thermique, etc.) qui permettent de comparer ou de classer les lubrifiants en fonction de leurs usages potentiels et de leurs caractéristiques. Nous avons essayé de mettre en évidence la complexité de la composition des lubrifiants.

Maintenant que nous savons qu'un lubrifiant est composé d'une huile de base associée à de nombreux additifs en fonction des besoins à satisfaire, et qui, de part leur nature, réagissent avec le système lubrifié, nous pouvons aisément imaginer que lors du fonctionnement d'un moteur, les caractéristiques du lubrifiant vont évoluer. C'est ce que nous allons voir dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

LE VIEILLISSEMENT ET DEGRADATION DU LUBRIFIANT EN SERVICE

CHAPITRE II

LE VIEILLISSEMENT ET LA DÉGRADATION DU LUBRIFIANT EN SERVICE

INTRODUCTION

Tout au long du chapitre précédent, nous avons passé en revue la liste exhaustive des propriétés que le lubrifiant doit satisfaire. Nous avons vu que les besoins à remplir peuvent être antagonistes et que des additifs sont indispensables pour la lubrification des pièces frottantes. D'autre part, nous avons remarqué que le lubrifiant est très lié avec le mécanisme lubrifié et qu'il doit être considéré comme un composant du système, et non pas comme une entité complémentaire. L'ensemble de ces données fait que le lubrifiant est souvent un produit très complexe. Et il est entendu que les propriétés demandées au lubrifiant, lors de sa mise en service doivent persister tout au long de son utilisation. Mais, tout comme les composants d'un système mécanique, le lubrifiant "s'use" lorsqu'il est utilisé.

En effet, les contraintes appliquées et les conditions de fonctionnement entraînent soit une évolution des caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant, soit l'apparition de nouveaux composés chimiques plus ou moins actifs, soit sa pollution. Après une certaine utilisation, il n'est pas rare que l'une ou plusieurs de ses caractéristiques atteignent une valeur limite, qui serait nuisible au bon fonctionnement du système lubrifié si elle était dépassée. C'est à ce moment précis que doit être effectuée la vidange du système lubrifié, ce qui permet le remplacement de la charge usée du lubrifiant déclaré hors service, par

une charge neuve. Notons que l'indication de la vidange peut être aussi liée à la pollution du lubrifiant lorsqu'elle est trop importante. Cette pollution peut être qualifiée d'« ingérée » lorsque l'environnement extérieur pollue la charge d'huile, ou de « générée » lorsque le système se pollue lui-même.

1 VIEILLISSEMENT ET DEGRADATION DU LUBRIFIANT

Le vieillissement des lubrifiants est un processus complexe. Il est continuellement étudié, mais l'amélioration continue des huiles de base, des additifs et des mécanismes lubrifiés fait que les causes et les effets du vieillissement du lubrifiant évoluent. Dans la présente partie de notre travail, nous allons donner un aperçu du vieillissement et de la dégradation du lubrifiant.

Précisons que le vieillissement du lubrifiant est l'évolution, dans le temps, de ses caractéristiques physico-chimiques, et que la dégradation du lubrifiant est la perte de l'aptitude du lubrifiant à effectuer son rôle. Cette perte peut être entraînée par l'évolution de l'une de ses caractéristiques physico-chimiques à l'extérieur d'un domaine défini ou par sa pollution. Les facteurs qui peuvent entraîner l'évolution des caractéristiques physico-chimiques sont de quatre natures :

- chimiques ;
- thermiques ;
- mécaniques ;
- contamination.

Par exemple, l'oxydation du lubrifiant fait partie du premier cas, alors que la dégradation thermique du lubrifiant illustre le second. Le cisaillement fait partie du troisième cas. Enfin, la pollution liquide ou solide du lubrifiant appartient au dernier cas.

La dégradation d'un lubrifiant peut se traduire par trois effets distincts qui peuvent apparaître simultanément ou non. Elle peut se manifester par la variation de l'une ou de plusieurs des caractéristiques physiques et chimiques du lubrifiant ou par sa pollution. Il convient de bien séparer les deux premiers effets du dernier, qui est totalement différent. En effet, la pollution entraîne une usure plus importante et plus rapide des éléments lubrifiés. De plus, elle affecte indirectement le lubrifiant, car elle accélère les réactions chimiques de dégradation de ce dernier en jouant le rôle de catalyseur.

Le cas de l'évolution des caractéristiques chimiques et physiques est complexe en lui-même car cette évolution peut être due à la dégradation de l'huile de base ou à la dégradation des additifs. L'étude de la dégradation des lubrifiants présente des difficultés du fait que les caractéristiques à suivre peuvent être totalement différentes et qu'elles nécessitent des moyens de mesure non compatibles. De plus, les domaines acceptés de variation des caractéristiques sont fonction de la composition du lubrifiant et de son utilisation. Il n'existe donc pas de règles générales qui permettent de déterminer facilement les seuils limites de variation.

Dans le cas des lubrifiants pour moteurs, le vieillissement accéléré peut être dissocié en deux catégories bien distinctes : le vieillissement induit par les hautes températures et les sollicitations sévères du moteur, et le vieillissement induit par les faibles températures et les petits trajets. Dans le cas des lubrifiants pour moteur, la première catégorie comprend l'oxydation, le cisaillement et la pollution du lubrifiant par les résidus de combustion, alors que la seconde catégorie renferme la pollution du lubrifiant par l'eau ou par le carburant, ainsi que l'usure et la corrosion du système lubrifié. S'ajoute à ces deux vieillissements accélérés le vieillissement normal du lubrifiant qui existe en tout temps.

Ce phénomène de vieillissement est encore plus complexe car plusieurs types de dégradations peuvent avoir lieu simultanément ou en cascades et pouvant engendrer des conséquences multiples. A titre d'exemple, l'oxydation du lubrifiant génère de nouveaux composés chimiques, dont des acides, qui vont attaquer les métaux sensibles, tels que le cuivre et des composés insolubles qui vont épaissir le lubrifiant et faire augmenter sa viscosité. L'oxydation entraîne aussi une consommation d'additifs antioxydants qui peuvent avoir un double rôle (par exemple, l'additif DTPZn a un rôle d'antioxydant mais aussi d'anti-usure et d'extrême pression).

1.1 L'oxydation du lubrifiant

La réaction d'oxydation est l'une des principales causes de dégradation du lubrifiant. Il est en effet, pratiquement impossible d'éviter tout contact entre l'air et le fluide, donc théoriquement, le phénomène d'oxydation est inévitable. La vitesse de la réaction est principalement fonction de la nature du fluide et de sa température, mais la présence de catalyseurs peut l'accélérer. Il est communément accepté [14, 26, 27] que la vitesse

d'oxydation d'une huile minérale non inhibée est très faible en dessous de 60°C mais qu'une fois cette limite dépassée, la vitesse d'oxydation s'accroît de façon exponentielle, doublant pratiquement tous les 10°C, si bien qu'à 90°C, elle est sensiblement huit fois plus élevée qu'à 60°C.

La vitesse d'oxydation n'est pas seulement fonction de l'huile de base et des additifs mais aussi des conditions d'utilisation. La pression, la présence de contaminants, d'eau, de particules métalliques et l'agitation accélèrent le processus d'oxydation.

1.2 La variation de la viscosité

La variation de la viscosité (diminution ou augmentation) a des effets indésirables sur le système lubrifié. La diminution de la viscosité entraîne plus de fuites internes, une usure excessive des pièces en mouvement ainsi qu'une mauvaise lubrification. De son côté, l'augmentation de la viscosité engendre des pics de pression dans les restrictions hydrauliques ainsi qu'une baisse de rendement du système lubrifié.

La diminution de la viscosité est liée au cisaillement du lubrifiant qui se produit essentiellement à trois places dans le cas des lubrifiants pour transmission : entre les dents d'engrenages, entre les éléments fixes (bagues) et les éléments mobiles (billes et rouleaux) des roulements et butées, et lors du passage du fluide dans les restrictions hydrauliques telles que les clapets limiteurs de débit ou de pression. Dans le cas des lubrifiants pour moteurs, le cisaillement se produit également dans les paliers lisses et au niveau du contact piston- cylindre.

L'huile de base utilisée dans la composition des lubrifiants possède généralement une très bonne résistance au cisaillement. De ce fait, son cisaillement est faible et lent.

Cependant, certains additifs ne possèdent pas la même résistance au cisaillement que l'huile de base. Il s'agit tout particulièrement des améliorateurs de viscosité qui permettent d'améliorer les caractéristiques viscosité-température du lubrifiant. Ces additifs appelés « améliorant d'indice de viscosité » sont souvent des polymères à longue chaîne dont le poids moléculaire varie entre 10^4 et 10^6 [20]. De par leur nature, ils augmentent la viscosité du lubrifiant à toutes les températures, mais cette augmentation est plus

prononcée à des températures élevées qu'à des températures faibles. En effet, les molécules forment des « pelotes » qui emprisonnent un volume d'huile de base.

Lorsque la température augmente, les dimensions de la pelote augmentent, ainsi que le volume emprisonné. Ce qui entraîne un épaissement du lubrifiant.

La présence d'un améliorateur de viscosité entraîne l'apparition de deux effets lors du cisaillement (figure 2.1). Le premier, réversible, est la diminution de la viscosité sous l'effet du cisaillement suite à une déformation des molécules du polymère.

Le second est la dégradation mécanique permanente de l'additif sous l'effet d'un très fort cisaillement (figure 2.1). La dégradation se traduit par la rupture de la chaîne moléculaire du polymère par l'action des efforts qu'elle subit dans les zones de gradient de vitesse élevé. Les molécules de l'améliorateur de viscosité sont d'autant plus exposées au phénomène de cisaillement qu'elles sont longues.

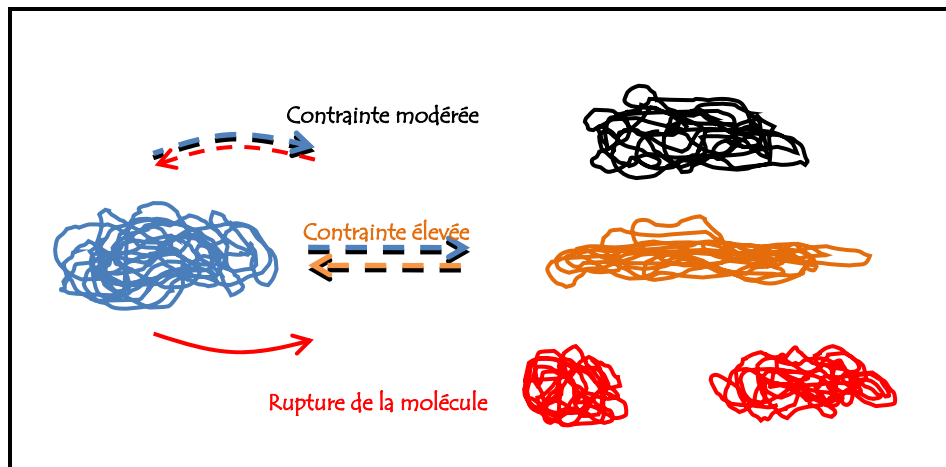


Figure 2.1 : Cisaillement mécanique du polymère améliorateur de viscosité

Il convient donc de bien sélectionner les additifs améliorant l'indice de viscosité en fonction de l'application choisie, des contraintes attendues et de leur compatibilité avec les additifs existants. Dans le cas contraire, on s'expose à une forte baisse de la viscosité qui peut être préjudiciable comme le mentionnent Cave et Michael [16]. La variation de la viscosité est déterminée en mesurant la viscosité du lubrifiant au cours de son utilisation et en comparant le résultat obtenu à la viscosité initiale, si cette dernière a été mesurée précédemment, ou à la viscosité théorique du fluide dans le cas contraire.

1.3 La contamination par un liquide

La contamination du lubrifiant par un liquide étranger représente une des formes courantes de pollution : principalement par l'eau (condensation) dans le système mécanique, le carburant ou le liquide antigel (cas des moteurs). Les conséquences de cette pollution sont diverses et souvent catastrophiques pour le système lubrifié.

1.3.1 La contamination par l'eau

La présence d'eau dans un lubrifiant peut entraîner plusieurs effets dont la corrosion des métaux ou l'hydrolyse de certains additifs dont les additifs anti-usure. Cette contamination provient en majorité de la condensation de l'humidité présente dans l'air ambiant lors du refroidissement du système lubrifié ou d'une entrée d'eau accidentelle dans le système lubrifié.

De nombreuses méthodes et tests existent pour la détection de l'eau. Il est possible, par exemple, de distiller le lubrifiant à l'aide d'un solvant non miscible à l'eau, ou de faire réagir un composé chimique avec l'eau contenue dans le lubrifiant ou de porter rapidement un petit volume de lubrifiant à plus de 100°C. Dans ce dernier cas, si de l'eau est présente elle va immédiatement se transformer en vapeur et produire des bulles qui crépiteront dans l'huile.

1.3.2 La contamination par le carburant ou par d'autres liquides

Les deux autres liquides les plus courants pouvant contaminer le lubrifiant sont le liquide antigel du circuit de refroidissement et le carburant (gasoil ou essence) [28, 29, 30]. Cette contamination est usuelle pour les lubrifiants pour moteur (surtout la contamination par le carburant), mais elle est rare dans le cas des lubrifiants pour transmissions, car le carburant et le liquide antigel ne sont généralement pas en contact direct avec la transmission.

1.4 La contamination par les produits non liquides

Les produits solides qui contaminent le lubrifiant peuvent être générés ou ingérés par le système. Ils peuvent prendre plusieurs formes physiques: particules solides, boues, molécules. C'est ce que nous allons aborder dans ce qui suit.

1.4.1 Les contaminants solides générés

Les contaminants générés proviennent de deux sources bien distinctes qui sont le système lubrifié et le lubrifiant lui-même. Dans le premier cas, les contaminants sont des particules d'usure du système lubrifié. Ces particules sont arrachées aux divers éléments en mouvement, puis sont transportées par le lubrifiant pour ensuite être captées par les filtres. Cependant, certaines d'entre elles restent en suspension dans le lubrifiant. La présence de particules solides en excès affecte le bon fonctionnement des circuits hydrauliques, tout en entraînant une usure plus importante des pièces mécaniques par abrasion. De plus, cette présence augmente aussi les surfaces de contact « métal/lubrifiant » et accélère de ce fait les réactions chimiques de vieillissement.

Ces particules solides qui proviennent de l'usure du système lubrifié sont essentiellement des particules métalliques. Leur grosseur et leur morphologie indiquent l'état de santé du système lubrifié et préviennent de l'imminence d'une défaillance, comme cela est montré à la figure 2.2. En effet, un système mécanique sain produira uniquement des petites particules d'une dimension pouvant varier entre 0,1 et 5 μm , alors qu'un système mécanique proche de la défaillance produira de grosses particules en grande quantité, de 50 à 500 μm , voire plus. Le lubrifiant peut lui aussi produire des contaminants solides ou semi-solides issus de sa dégradation. Sont désignés par produits de dégradation du lubrifiant les gommes, les matières charbonneuses, les résines insolubles, les vernis (voir annexe A), ainsi que les autres produits de dégradation de l'huile de base et de ses additifs. Cette contamination provient de la transformation des éléments de base du lubrifiant sous l'effet de trop fortes contraintes thermiques ou chimiques par exemple dans le cas de l'oxydation du lubrifiant. Ces produits peuvent se déposer sur les pièces du système lubrifié. Cependant, la présence d'additifs dispersants permet de les garder en suspension afin qu'ils soient ensuite captés par les filtres.

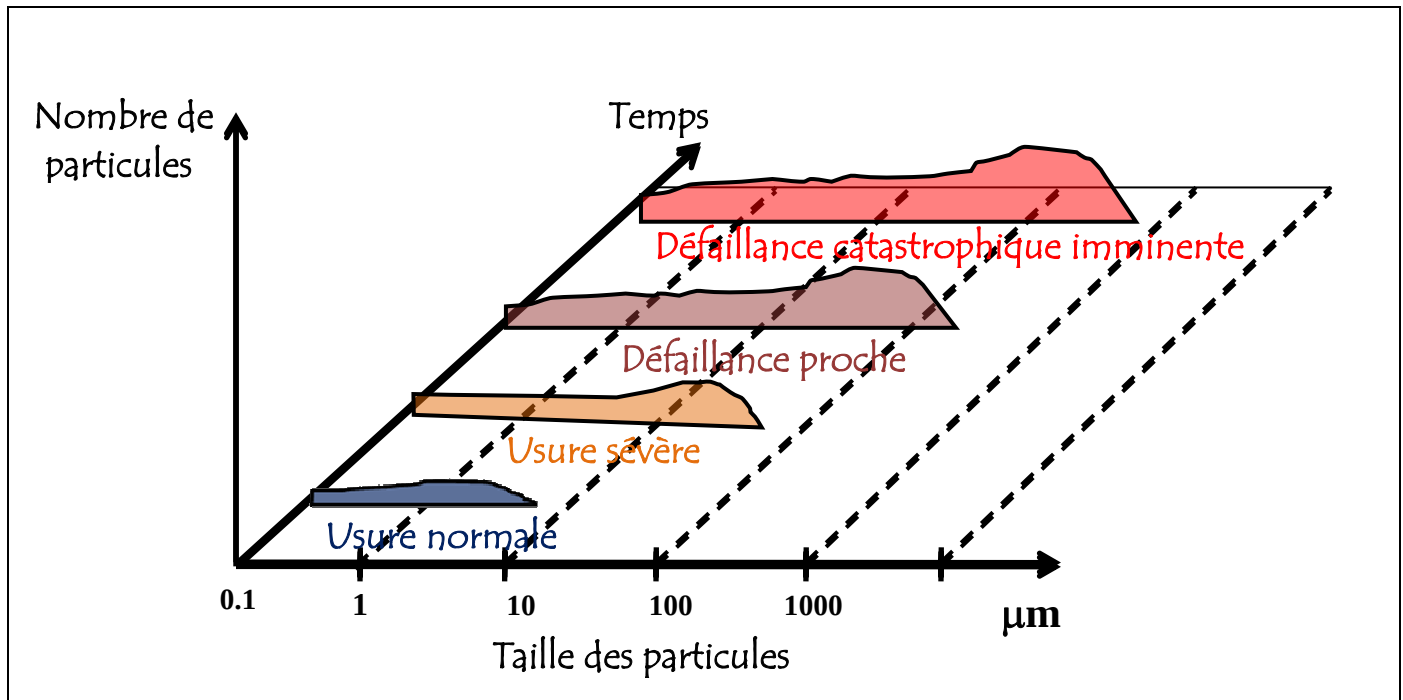


Figure 2.2 : Evolution de la taille et de la quantité des particules avant la dégradation

Les particules solides peuvent être détectées dans le lubrifiant par divers capteurs surtout si elles sont métalliques ou magnétiques. Dans ce dernier cas des capteurs magnétiques permettent de les intercepter et de quantifier le dépôt. Mais les techniques les plus utilisées pour la détection des particules solides sont les compteurs de particules et les méthodes de laboratoire telles que spectrométrie, comptage de particules manuel et analyse microscopique des particules [31].

1.4.2 Les contaminants solides ingérés

Les particules solides ingérées qui contaminent le lubrifiant proviennent toujours du milieu extérieur. Elles le sont soit au cours de la fabrication du système soit au cours de son fonctionnement. Les premières, c'est-à-dire celles nées de la fabrication sont normalement éliminées par le rinçage et le nettoyage du système lors de la phase de rodage, mais certaines d'entre elles peuvent subsister. Les particules qui sont ingérées lors du fonctionnement du système sont essentiellement de la poussière, c'est-à-dire du sable (silice). Une bonne étanchéité du système lubrifié associée à une filtration adéquate permettent de limiter au mieux l'entrée des ces particules indésirables. Dans le cas des lubrifiants pour moteurs, la pollution du lubrifiant peut aussi être engendrée par les résidus de combustion, imbrûlés, cendres ou autres, qui passent de la

chambre de combustion au lubrifiant par les jeux de fonctionnement. Dans le cas des moteurs diesel, ce sont les suies qui polluent le plus le lubrifiant, faisant ainsi augmenter artificiellement sa viscosité. Ces dernières années, de nouveaux problèmes associés aux lubrifiants pour moteurs sont apparus suite à la mise en place de réglementations antipollution. Ces nouvelles normes entraînent la modification des réglages de combustion, ce qui génère alors une quantité plus importante d'imbrûlés qui se retrouvent dans le lubrifiant en fin de parcours.

2 LES DIFFERENTS MODES DE SUIVI DE LA DEGRADATION DES LUBRIFIANTS

2.1 Le suivi hors ligne

Nous allons maintenant détailler le premier mode de suivi qui est le suivi « hors ligne ». Dans ce mode de suivi se retrouvent toutes les méthodes complexes qui nécessitent un équipement de laboratoire, du personnel qualifié et des conditions de mesure précises. Nous pouvons y classer les méthodes, citées au chapitre précédent, qui permettent par exemple de mesurer les caractéristiques des lubrifiants.

2.1.1 Principe du suivi hors ligne

Le suivi hors ligne est composé de deux actions bien distinctes : la première consiste à prélever un échantillon représentatif du lubrifiant à caractériser et la seconde à analyser l'échantillon pour y mesurer les valeurs nécessaires. Ce mode de suivi est le plus ancien car il reprend dans la plupart des cas, les méthodes de test utilisées pour la caractérisation des lubrifiants neufs. Ce suivi hors ligne peut être rigoureusement le même que celui pour un lubrifiant neuf.

Les méthodes de suivi hors ligne sont:

- la méthode basée sur les analyses rapides: l'appréciation de l'état d'une huile en cours de service peut se déduire en première approximation de plusieurs types d'essais indiquant la quantité de matières charbonneuses véhiculées par l'huile, l'aptitude de l'huile à disperser ces matières charbonneuses, la dilution de l'huile

par le carburant et les changements de l'huile résultant de son oxydation ou de sa corrosivité.

- la méthode basée sur les analyses poussées, telle que la spectrographie, pour suivre l'usure des moteurs.
- la méthode basée sur les analyses classiques, ou essais standard, pour une étude détaillée de l'évolution des huiles.

Les résultats obtenus doivent ensuite être interprétés en fonction du système et du lubrifiant utilisé. De plus, une analyse unique n'est souvent pas suffisante, car elle ne permet pas de tirer des conclusions fiables. Il est généralement nécessaire de disposer de plusieurs mesures, issues de plusieurs échantillons différents, ou d'un historique qui est alors beaucoup plus riche et dont les résultats d'analyses sont plus fiables. Enfin, le dernier aspect à ne pas négliger est le fait que volume du lubrifiant à analyser est limité et que chaque test consomme une partie du lubrifiant. Lorsque la consommation est très faible par rapport au volume du bain de lubrifiant à analyser, de nombreux tests peuvent alors être effectués sans générer de perturbations. Dans le cas contraire, le nombre de prélèvements est alors limité.

Ces analyses nécessitent souvent un matériel de laboratoire sophistiqué et coûteux et les résultats ne sont pas immédiats. De plus, il faut assurer une logistique depuis le prélèvement de l'échantillon jusqu'à son arrivée au laboratoire d'analyses. Ce mode de suivi peut présenter des inconvénients majeurs lorsque les résultats doivent être connus immédiatement.

2.1.2 Synthèse sur le suivi hors ligne

Le suivi hors ligne nécessite tout d'abord une logistique appropriée et entraîne un délai entre le moment du prélèvement et l'obtention du résultat de l'analyse. Il nécessite aussi une interprétation de la valeur obtenue afin de déterminer si cette valeur est normale ou non.

La logistique nécessaire peut être réduite au strict minimum avec l'existence de moyens matériels (poste, transporteur, etc.) et la proximité du laboratoire d'analyse.

Le délai d'obtention des résultats peut être aussi considéré comme une contrainte. Par exemple, pour les tracteurs agricoles, le délai minimal entre l'instant du prélèvement et son analyse est de deux à trois jours, alors que le délai courant est de quatre à cinq jours. Enfin, ce mode de suivi nécessite l'interprétation du résultat de l'analyse, interprétation qui ne peut être réalisée que par un expert possédant la base de données adaptée et les connaissances requises. En effet, pour un certain couple « matériel/lubrifiant », le résultat peut indiquer un fonctionnement normal alors que pour un autre couple « matériel / lubrifiant », le même résultat peut indiquer un fonctionnement non conforme. Étant donné notre objectif, qui est la détermination -si possible en ligne- du meilleur moment pour la vidange du lubrifiant, ce principe de suivi ne semble pas être le plus approprié.

2.2 Le suivi par modèles prédictifs

Passons maintenant au deuxième mode de suivi appelé "suivi par modèles prédictifs". Ce mode de suivi consiste à mesurer en ligne, c'est à dire directement sur le système, un certain nombre de paramètres qui influencent l'évolution des caractéristiques du lubrifiant de façon significative, puis à déterminer, à l'aide d'un modèle, l'état de dégradation du lubrifiant. Il convient de noter que toutes les mesures effectuées en laboratoire et détaillées dans le chapitre précédent sont exclues de ce mode de suivi.

Les premiers travaux dans cette voie, sur les lubrifiants pour moteurs, datent de la fin des années 1950 [32]. Les auteurs de ces travaux répertorient huit modèles qui permettent de quantifier l'évolution de l'état du lubrifiant. Ces modèles peuvent être regroupés en deux ensembles :

- Un ensemble basé sur des modélisations simples telles que modélisation de réactions chimiques particulières, prise en compte des appoints pour le calcul d'un âge moyen de la charge de lubrifiant, comptage du nombre d'explosions.
- Un ensemble basé sur des modélisations plus complexes qui intègrent la notion de sévérité de service ou l'utilisation en parallèle de nombreuses conditions.

2.2.1 Principe du suivi par modèle prédictif

Étant donné que les phénomènes du vieillissement et de la dégradation des lubrifiants sont complexes, leurs modélisations ne sont pas aisées. De ce fait, plusieurs pistes sont possibles suivant l'approche envisagée pour le suivi de la dégradation. Il est concevable de travailler sur l'approche chimique d'un lubrifiant en ne s'intéressant qu'aux réactions chimiques et à leur cinétique. Il est également envisageable de considérer le lubrifiant comme « une boîte noire » en analysant ses entrées et ses sorties. Et il est aussi possible de combiner les deux approches.

Le principe de ce mode de suivi est basé sur la modélisation de l'un ou de plusieurs phénomènes de dégradation du lubrifiant analysé. Cette modélisation utilise, en entrée, les contraintes appliquées au lubrifiant et donne, en sortie la modification des caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant. A l'aide d'informations d'entrée judicieusement choisies, mesurées continuellement lors du fonctionnement du dispositif ou du véhicule observé, ce modèle procède à l'évaluation de la dégradation du lubrifiant. Lorsqu'un des seuils de dégradation prédéfini est atteint, il signale au conducteur du véhicule qu'une vidange est requise.

Nous allons classer les différentes réalisations en trois familles, en fonction de la nature de l'information donnée par le modèle. La première famille regroupera les réalisations qui informent sur «la durée de vie » de la charge d'huile. La seconde famille comprendra les réalisations qui renseignent sur un « nombre de vie » de la charge d'huile, nombre exprimé en distance parcourue, en quantité de carburant consommée ou en révolutions du moteur. Enfin, la troisième famille englobera les réalisations qui utilisent «un indice de dégradation» adimensionnel de l'huile.

2.2.2 Synthèse sur le suivi par modélisation

Cette méthode de suivi de la dégradation par modélisation semble être une voie prometteuse étant donné que les automobiles contiennent de plus en plus de dispositifs électroniques d'aide à la conduite ou de gestion de la conduite, dispositifs qui peuvent alors inclure, à un coût marginal faible, le modèle et son algorithme de traitement.

Cependant, ces modèles sont encore peu montés sur les véhicules automobiles à l'heure actuelle, RENAULT a intégré le sien dans l'ordinateur de bord de la Safrane, BMW

utilise le sien depuis quelques années, et Ford ou General Motors n'ont pas encore développé leurs produits sur le marché européen.

Néanmoins, les modélisations utilisées ne fournissent des informations sur l'état du lubrifiant que dans des limites qui leur sont imposées, car elles ne peuvent pas intégrer toutes les modifications possibles des conditions d'environnement qui ont été défiés. Par exemple, la qualité du lubrifiant est intégrée dans le modèle sans pouvoir être modifiée, et la température idéale de fonctionnement fluctue beaucoup selon les auteurs et les modélisations. Si pour Schwartz et General Motor la température idéale se situe entre 80 et 130 °C, pour Sawatari [33] elle est entre 0 et 100 °C pour BMW, elle doit être simplement supérieure à 0 °C.

A l'heure actuelle, les modèles présentés ne permettent donc pas d'identifier :

- la mauvaise qualité du lubrifiant (erreur de formulation) ;
- l'utilisation d'un lubrifiant non conforme (erreur de remplissage du carter) ;
- la contamination du lubrifiant par un autre liquide (eau. carburant) ;
- la contamination accidentelle du lubrifiant par des polluants divers.

Malgré les réserves précédentes, ce mode de suivi présente un avantage notable : le remplacement des analyses de laboratoire complexes et coûteuses par des paramètres de suivi faciles à mesurer. Ces derniers étant représentatifs du fonctionnement du véhicule et de la dégradation du lubrifiant.

Cependant, si on désire connaître, en tout temps, l'état réel du lubrifiant, il faut intégrer ces remarques dans les modèles, ce qui n'est pas possible sans modifier leur architecture. La seule solution possible consiste donc à mesurer l'état du lubrifiant à l'aide d'un capteur embarqué. C'est ce que nous allons détailler dans la partie suivante.

2.3 Le Suivi en ligne du lubrifiant avec un capteur embarqué

Ce paragraphe va donner au lecteur les grandes lignes du suivi en ligne de la dégradation du lubrifiant à l'aide d'un capteur. Ce mode de suivi diffère des deux précédents par le fait que le capteur est en contact direct avec la charge d'huile à surveiller, ce qui évite le prélèvement et la logistique associée dans le cas du suivi hors ligne, ou la seule estimation de l'état du lubrifiant dans le cas du suivi en ligne par modélisation.

Ce mode de suivi semble être le plus prometteur bien que les réalisations fonctionnelles ne soient pas légion actuellement. L'essor des connaissances du processus de dégradation des lubrifiants est tel que ces techniques ne peuvent qu'évoluer vers de meilleurs résultats, plus fiables et plus précis, avec des capteurs dotés d'une capacité d'analyse, d'interprétation et de communication de la mesure.

Dans son article de synthèse sur les dispositifs de suivi de l'état des lubrifiants pour moteurs automobile, Smolenski [32] cite cinq réalisations de capteurs. Par ailleurs, en 1994 le CETIM [34] avait répertorié 43 capteurs permettant de suivre en ligne les caractéristiques du lubrifiant telles que la viscosité, l'acidité, la teneur en soufre, la teneur en eau, la contamination, etc. Cependant, après étude, il apparaît que ces capteurs sont principalement dédiés à des postes de mesures fixes et qu'ils ne peuvent être embarqués.

2.3.1 Principe du suivi en ligne

Ce mode de suivi consiste principalement à mesurer, à l'aide d'un capteur en contact direct avec le lubrifiant, une caractéristique physique ou électrochimique du fluide et à exploiter le résultat obtenu. Cette exploitation peut être directe, comme elle peut se traduire par une interprétation de la mesure en cas d'existence d'une corrélation entre la caractéristique électrochimique mesurée et l'évolution de l'une des caractéristiques du lubrifiant. Un second principe existe bien que moins développé. Il s'agit d'utiliser un élément sensible intermédiaire qui réagit avec les éléments la dégradation du lubrifiant et dont il est aisé de suivre l'évolution. Ce composé joue alors le rôle de « fusible » et lorsqu'il lui arrive d'être détruit, le lubrifiant doit être changé.

Les capteurs utilisés peuvent être sensibles soit aux réactions chimiques, soit aux réactions électrochimiques (conductivité, conductimétrie, capacité diélectrique, micro-ondes. etc.), soit à des réactions physiques (perte de charge, vibrations). Le paramètre mesuré peut être directement représentatif de l'état de l'huile tel que l'indice d'acide du lubrifiant [35, 36], la viscosité [37], la teneur en particules [31], la conductivité [19, 38, 39] ou la constante diélectrique [40, 41, 42, 43]. La seconde famille est celle des capteurs qui mesurent l'évolution d'un témoin dont au moins une des caractéristiques varie avec la

dégradation de l'huile, par exemple la corrosion du témoin lui-même (plomb, cuivre) par l'huile [44].

Le capteur, dont la durée de vie doit être supérieure à celle de la charge de lubrifiant, permet d'éliminer les contraintes de prélèvement et de transport de l'échantillon à analyser. Son implantation induit cependant de nouvelles contraintes car il subit alors de nombreuses agressions de nature :

- thermique (plage de température oscillant entre -40 °C et 180 °C) ;
- vibratoire ;
- mécanique ;
- chimique (présence d'eau, de carburant, d'acides, de boues, etc.).

2.3.2 Synthèse sur le suivi en ligne avec un capteur embarqué

Les capteurs n'autorisent le suivi que d'un seul mode de dégradation du lubrifiant, ce qui entraîne l'utilisation de plusieurs capteurs en parallèle si on veut suivre tous les modes de dégradation du lubrifiant. Cependant, aucune information concernant le coût, de conception ou de réalisation, des capteurs n'est donnée, mais il est certain que tant que leur volume de production sera limité, les coûts seront élevés. De plus, l'utilisation de plusieurs capteurs en parallèle ne fera qu'amplifier cette tendance.

Nous venons d'énumérer les différentes dégradations pouvant toucher les lubrifiants ainsi que les différentes méthodes d'analyse préconisées. Nous allons maintenant présenter notre recherche sur la dégradation de deux lubrifiant particuliers.

CHAPITRE III

CLASSIFICATIONS ET SPECIFICATIONS

CHAPITRE III

CLASSIFICATIONS ET SPECIFICATIONS

INTRODUCTION

Les lubrifiants se catégorisent par des classifications, des spécifications, des normes et par des cahiers de charges émanant d'organismes nationaux ou internationaux- civils ou militaires-, de constructeurs de matériels et, parfois de grands utilisateurs comme les armées nationales ou les grandes administrations. Ces distinctions permettent de comparer et de classer les lubrifiants en fonction de leur usage potentiel et de mieux qualifier les produits.

Nous allons parler de leurs classifications et de leurs spécifications :

- les premières sont données à titre informel et n'ont pas un caractère obligatoire, elles ne constituent que des recommandations d'emploi ;
- les secondes, au contraire, présentent un caractère « législatif » puisque les organismes d'utilisateurs (tels que les grands constructeurs d'automobiles) les intègrent dans leurs préconisations.

Nous nous restreignons dans ce chapitre aux huiles pour moteurs.

Les classifications des lubrifiants d'automobiles sont actuellement définies par les organismes suivants :

- Comité des Constructeurs d'automobiles du Marché Commun (CCMC) devenu en 1991 Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) pour l'Europe ;
- Society of Automotive Engineers (SAE) et American Petroleum Institute (API) pour les Etats-Unis ;
- International Lubricant Standardization and Approval Committee (ILSAC) qui ne concerne que les huiles destinées aux moteurs à essence aux Etats-unis et au Japon ;
- Les grands constructeurs d'automobiles et de moteurs industriels ;

- Spécifications militaires ;
- Les grandes administrations.

Ces normes sont en constante évolution du fait, à la fois des progrès technologiques réalisés dans la conception et les performances des véhicules, et de la prise en compte des exigences environnementales.

1 CLASSIFICATIONS

1.1 Classification de viscosité SAE

Cette classification, d'usage universel, prend pour critère principal la viscosité vu son importance pour les lubrifiants. Pour cela, dès 1911, la SAE a établi une classification de viscosités des lubrifiants destinés aux moteurs en définissant différents "grades" qui correspondent à des données précises. Deux types de "grades" coexistent actuellement, l'un pour les huiles utilisées par temps froid et l'autre pour les huiles utilisées à des températures plus élevées. Cette classification évolue régulièrement pour s'adapter aux exigences d'opérabilité à froid et de sécurité à chaud des nouveaux moteurs.

En effet, depuis 1972, la classification a subi plusieurs changements afin d'introduire de nouveaux grades, pour tenir compte des unités internationales (S.I) et pour être plus proche de la réalité pour les viscosités à froid (tableau 3.1). Au lieu de définir une viscosité limite pour une température donnée, on définit une température limite pour une viscosité donnée. De plus, la SAE a introduit une exigence qui concerne la température limite de pompabilité de l'huile. Cette exigence garantit une lubrification minimale pour un moteur qui aurait réussi à démarrer alors qu'il est à sa température limite de fonctionnement. Enfin des exigences concernant la viscosité à haute température ont été introduites en 1993.

La dernière version datant de mai 2009 (SAE J3000 MAI 09) définit onze niveaux de base ou six grades d'huiles Hiver « W », de l'abréviation anglaise « winter » qui sont caractérisés par leur viscosité à basse température et cinq « grades » d'huiles ont été caractérisées par leur viscosité à chaud (100°C), comme le montre le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Classification SAE des huiles moteurs (SAE J300, Mai.2009) [45]

Grade de viscosité SAE	Viscosité dynamique (mPa.s) en fonction de la température (°C)- Max		Viscosité cinématique (mm ² /s) à 100°C	
	Démarrage	Pompabilité	Min	Max
0W	6200 à -35°C	60000 à -40°C	3.8	-
5W	6600 à -30°C	60000 à -35°C	3.8	-
10W	7000 à -25°C	60000 à -30°C	4.1	-
15W	7000 à -20°C	60000 à -25°C	5.6	-
20W	9500 à -15°C	60000 à -20°C	5.6	-
25W	13000 à -10°C	60000 à -15°C	9.3	-
20	-	-	5.6	<9.3
30	-	-	9.3	<21.5
40	-	-	12.5	<16.3
50	-	-	16.3	<21.9
60	-	-	21.9	<26.1

1.2 Classifications de service API

Initialement due à l'API, la classification de service des lubrifiants pour moteurs est actuellement développée conjointement par les trois organismes américains API, SAE et ASTM D, en tenant compte des exigences des constructeurs américains de véhicules, AAMA (American Automobile Manufacturers Association) pour les véhicules de tourisme et l'EMA (Engine Manufacturers Association) pour les constructeurs de véhicules industriels.

La classification pour lubrifiants moteurs dite « de service » API-ASTM-SAE (SAE J183 JUN 91) répertorie les huiles en fonction de leurs performances sur moteur au banc.

1.3 Classification ILSAC

Cette classification, désignée par le sigle « GF-1 », et élaborée par la MVMA (Motor Vehicle Manufacturers' Association of the United States) et la JAMA (Japan Automobile Manufacturers' Association), concerne uniquement les huiles lubrifiantes destinées aux moteurs des véhicules à essence et n'est utilisée actuellement que par ces deux pays. Elle s'appuie sur la spécification API à laquelle elle ajoute des contraintes régionales.

2 SPECIFICATIONS

2.1 Spécifications européennes CCMC/ACEA

Les exigences des moteurs européens, plus performants et plus sévères que leurs homologues américains, étant insuffisamment couvertes par celles de la classification API, l'Europe y a rajouté ses propres séquences d'essai moteurs et physico-chimiques selon des procédures mises au point et normalisées (ou expérimentales) par le Comité Européen de Coordination.

2.2 Spécifications des constructeurs européens et américains

Les constructeurs de véhicules européens homologuent eux-mêmes leurs huiles selon leurs propres spécifications. Les plus connues, concernant les huiles pour véhicules de tourisme essence ou diesel, sont celles de VOLKSWAGEN et, jusqu'à une date récente, les spécifications de MERCEDES aujourd'hui abandonnées par le constructeur.

A signaler les spécifications françaises du Groupement Permanent d'Etudes des Marchés (GPME), qui s'appuient sur les classifications API-SAE et sur les spécifications CCMC/ACEA, auxquelles sont parfois rajoutés des essais spécifiques. Elles concernent les lubrifiants utilisés par les services publics de l'état.

Dans leurs préconisations, tous les constructeurs américains de véhicules de tourisme et industriels suivent en général les recommandations de l'API en y adjoignant des exigences en matière de caractéristiques physico-chimiques et, pour certains, des essais mécaniques supplémentaires.

2.3 Spécifications militaires

L'US ARMY a été la première à élaborer des spécifications d'huile moteurs pour ses propres besoins et ce, dès 1941. Durant de nombreuses années, elles ont constitué des références auxquelles le monde entier s'est conformé. Par contre, pour des applications civiles, elles sont progressivement supplantées par la classification de l'API dont elles s'inspirent largement.

Ces spécifications, désignées par les sigles MIL-L... (MILITARY Lubricant), définissent les huiles pour moteurs à essence et diesel ainsi que les huiles de transmissions manuelles.

A l'instar de l'armée américaine, les armées européennes (française, britannique, allemande et belge) ont défini leurs propres lubrifiants pour moteurs et transmissions manuelles, en s'inspirant des classifications SAE, API, CCMC et, bien entendu en utilisant, de plus en plus des essais européens mis au point par le CEC ou par leurs propres laboratoires.

Les deux huiles que nous avons étudiées sont partie intégrante de ces classifications. Nous allons maintenant présenter notre recherche sur la dégradation des deux lubrifiants choisis.

CHAPITRE IV

CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DES HUILES MOTEUR USAGEES

**NAFTILIA SUPER SAE 20W50
Et
CHELIA VP SUPER SAE 20W40**

3 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU LUBRIFIANT " CHELIA VP SUPER 20W40"

3.1 Caractéristiques physico-chimiques principales de l'huile neuve

Les principales caractéristiques physico-chimiques de l'huile neuve " CHELIA VP SUPER 20W40 " pour moteur diesel, déterminées selon les normes ASTM, sont regroupées dans le tableau 4.9.

Tableau 4.9: Caractéristiques physico-chimiques principales de l'huile neuve SAE 20W40

Caractéristiques	Huile Neuve SAE20W40	Normes ASTM
Masse volumique (kg/l)	0,8828	D 1298
Viscosité à 40°C (cSt)	133,35	D 445
Viscosité à 100°C (cSt)	14,98	D 445
Indice de viscosité	118	D 2270
Point d'éclair Cleveland (v.o) (°C)	262	D 92
T.A.N (mgKOH/g)	1,55	D 664
T.B.N (mgKOH/g)	8,15	D 2896
Carbone Conradson (%P)	1,1739	D 189
Cendres Sulfatées (%P)	1,0033	D 874
Teneur en Cendres	0,8302	NF EN ISO 6245
Point d'Ecoulement (°C)	-15	D 97
Teneur en soufre (%P)	0,3739	D 129

Nous tenons à signaler que l'huile utilisée dans le véhicule provient du même stock et qu'une réserve suffisante a été mise de côté, pour garder les caractéristiques initiales et assurer un suivi correct et fiable.

3.2 Caractéristiques physico-chimiques principales de l'huile usée

La série d'essais normalisés a été réalisée sur des huiles prélevées selon les consignes déjà cités et aux fréquences des vidanges D_i ($0 \leq i \leq 5$) en fonction du nombre de kilomètres parcourus par le véhicule à moteur diesel. Les résultats de l'analyse sont présentés dans le tableau récapitulatif 4.10. Ce dernier regroupe l'évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'huile en service par rapport aux caractéristiques de l'huile neuve de même catégorie.

Tableau 4.10 : Evolution des caractéristiques physico-chimiques de l'huile en service avec l'espacement des vidanges

Symboles des différentes vidanges	Espacement des Vidanges (Km)	Masse volumique à 15°C (Kg/l)	Viscosité à 40°C (cst)	Viscosité à 100°C (cst)	Indice de viscosité	Point éclair (v.o) (°C)	T.A.N (mgKOH/g)	T.B.N (mgKOH/g)	Point d'écoulement (°C)	Teneur en soufre %wt
D0	0	0,8808	133,35	14,98	115	262	1,55	8,15	-15	0,3739
D1	519	0,8816	122,41	13,95	113	236	2,06	7,74	-15	0,3613
D2	999	0,8826	121,33	13,86	113	240	2,66	7,48	-15	0,3676
D3	2054	0,8828	123,04	14,07	114	244	2,72	7,45	-15	0,3521
D4	4060	0,8841	128,23	14,23	110	236	3,01	7,10	-15	0,3427
D5	8059	0,8885	132,43	14,43	109	238	4,05	6,80	-18	0,4235

Les mesures comme nous pouvons le constater dans le tableau 4.10, confirment que l'espacement des vidanges influence réellement la qualité de l'huile lubrifiante.

3.3 Interprétation des résultats d'analyse

Comme pour l'huile "NAFTILIA SUPER SAE 20W50", nous allons aussi, nous attarder beaucoup plus sur l'interprétation du paramètre "viscosité" dans la mesure où celui-ci, comme nous l'avons précisé précédemment, est considéré comme la grandeur physique la plus importante dans les lubrifiants. Elle est approchée sous ses deux aspects à savoir cinématique et dynamique.

Les autres paramètres seront évoqués de façon moins détaillée.

3.3.1 Viscosité cinématique:

Nous avons observé curieusement, que la viscosité cinématique dans l'huile 20W40 a subi une chute conséquente à la première vidange faite à environ 500 km et ce, aussi bien à 40°C qu'à 100°C.

Cette forte chute surprenante pourrait éventuellement être comprise en faisant les mêmes tests sur plusieurs moteurs diesels différents aux mêmes intervalles de vidange. L'idéal serait de faire l'étude sur un certain nombre de véhicules afin de pouvoir comparer les résultats et tirer des conclusions.

Pour la vidange suivante à environ 1000km, la tendance reste à la baisse mais dans une moindre mesure puis la viscosité augmente jusqu'à atteindre 132,43cst à 40°C et 14,43cst à 100°C et ce à environ 8000km ; Comme nous pouvons le constater sur les graphes 4.43 4.44.

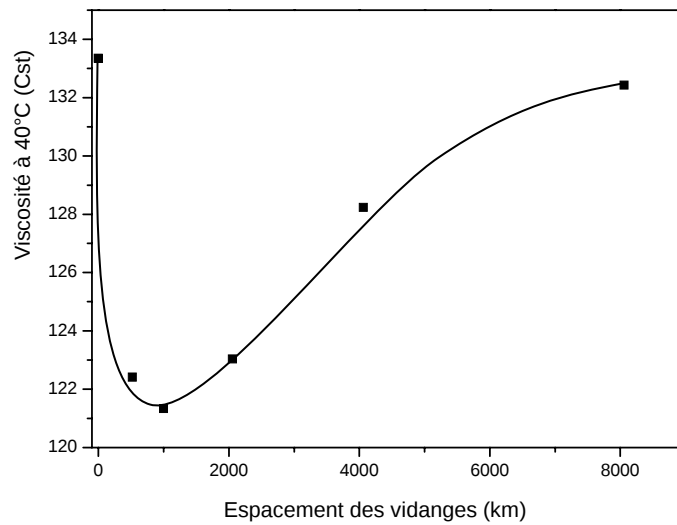


Figure 4.43: Variation de la viscosité à 40°C en fonction de l'espacement des vidanges

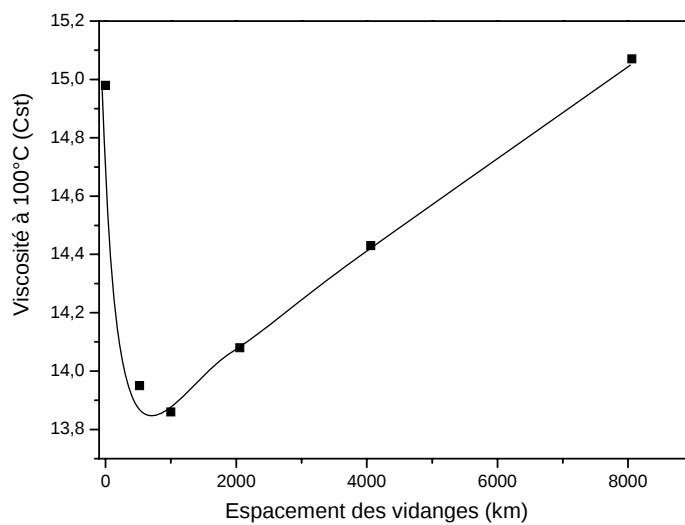


Figure 4.44: Variation de la viscosité à 100°C en fonction de l'espacement des vidanges

3.3.2 Etude rhéologique du lubrifiant

Nous effectuons les mêmes essais rhéométriques avec le même viscosimètre utilisé lors de l'analyse de l'huile 20W50 pour l'étude de l'évolution des paramètres rhéologiques de l'huile 20W40.

3.3.2.1 Rhéologie du lubrifiant SAE 20W40

Des essais ont été effectués sur l'huile neuve D0 et sur des échantillons prélevés à différentes vidanges D1, D2, D3, D4 et D5. En effet, chaque échantillon est introduit dans le viscosimètre où il est soumis à une série de température. Les résultats sont regroupés, sur les rhéogrammes des figures (4.45), (4.46), (4.47), (4.48), (4.49) et (4.50).

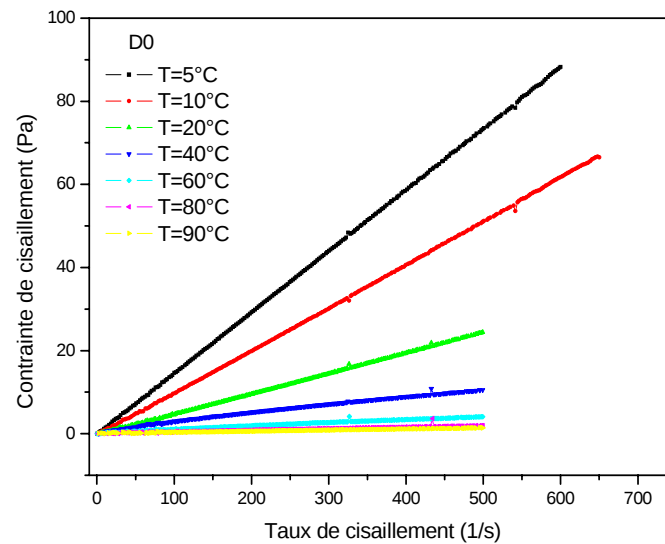


Figure 4.45: Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour l'huile neuve D0

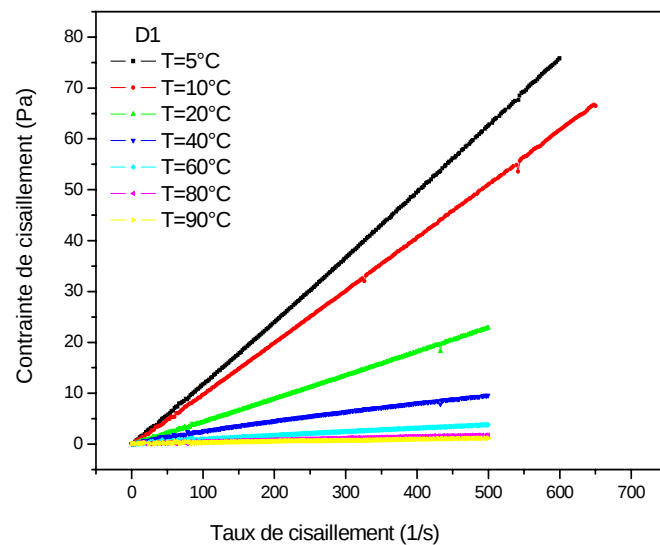


Figure 4.46: Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange D1

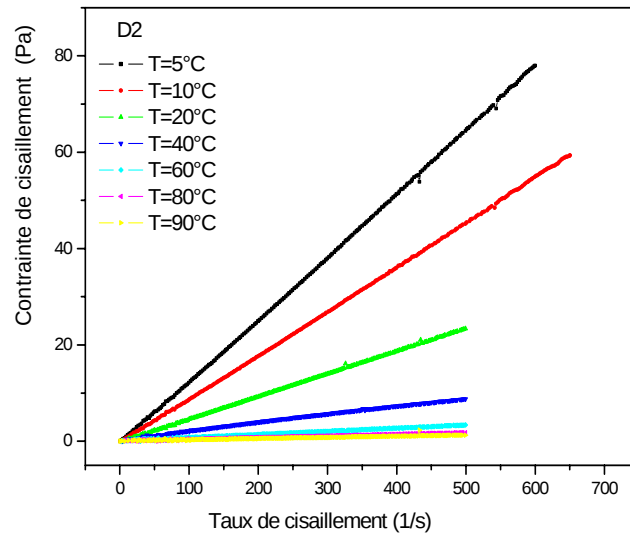


Figure 4.47 : Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange D2

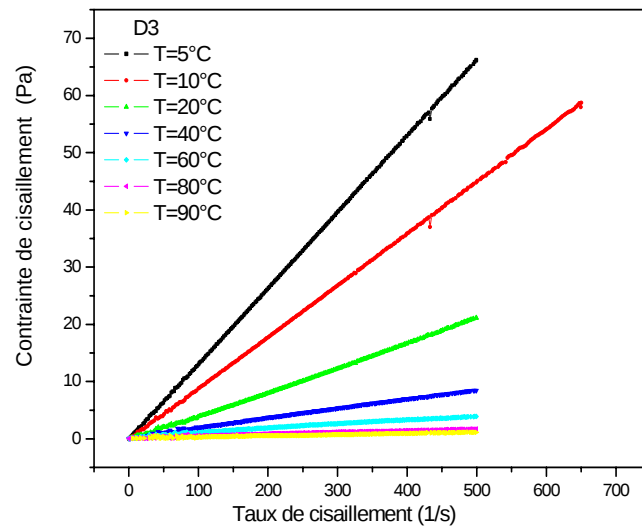


Figure 4.48: Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange D3

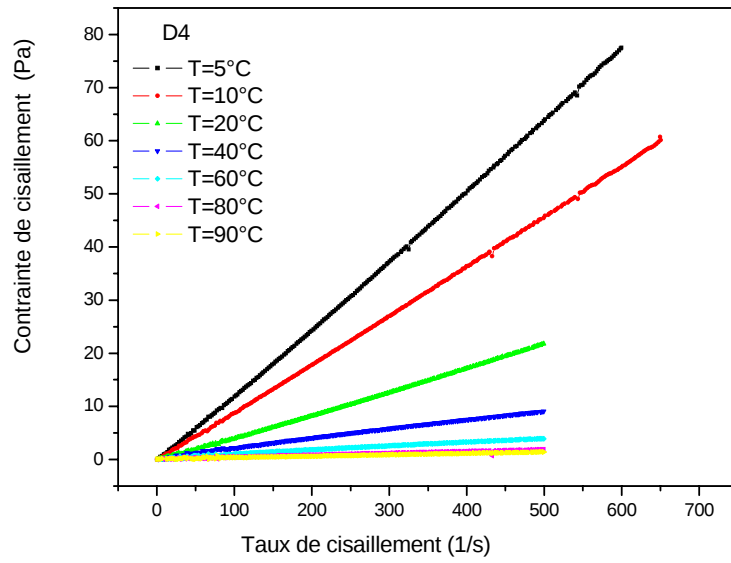


Figure 4.49: Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange D4

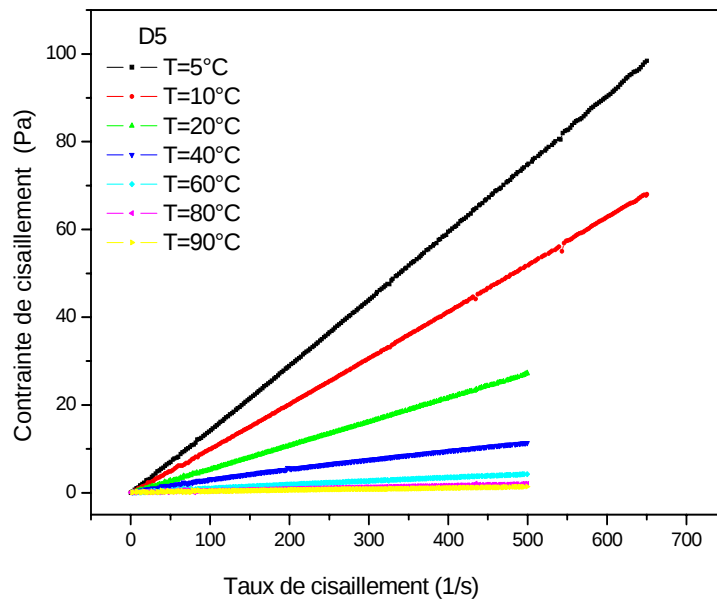


Figure 4.50: Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange D5

Comme nous pouvons le constater, pour toutes les vidanges, les courbes obtenues sont des droites. Ces droites impliquent que le fluide est newtonien, c'est-à-dire qu'à chaque température, la viscosité dynamique est constante.

Nous constatons également que pour les températures allant de 5°C à 60°C, les courbes sont distinctes, par contre pour les "hautes" températures allant de 60°C à 90°C, nous observons que, quelque soit la valeur du taux de cisaillement, la valeur de la contrainte de cisaillement reste invariable ce qui est représenté par les trois droites pratiquement confondues (à 60°C, 80°C et 90°C). Ceci suppose que le taux de cisaillement n'a pas d'incidence sur la viscosité dynamique pour les hautes températures. Ces dernières semblent constituer le facteur dominant dans la dégradation du lubrifiant par rapport au facteur taux de cisaillement.

3.3.2.2 Evolution de la viscosité dynamique en fonction de la température

Pareil que pour l'huile 20W50, nous déterminerons la viscosité dynamique en fonction de la température pour les différentes vidanges. Le tableau 4.10 regroupe les valeurs des viscosités dynamiques.

Tableau 4.10: Variation de la viscosité dynamique avec la température pour l'huile " SAE 20W40 "

T(°C) Vidanges	5°C	10°C	20°C	40°C	60°C	80°C	90°C
D0	0,1455	0,0996	0,0472	0,0260	0,0123	0,0043	0,0029
D1	0,1259	0,0996	0,0443	0,0253	0,0089	0,0037	0,0025
D2	0,1256	0,0886	0,0454	0,0198	0,0073	0,0036	0,0028
D3	0,1310	0,0885	0,0403	0,0185	0,0126	0,0039	0,0025
D4	0,1227	0,0895	0,0410	0,0202	0,0092	0,0042	0,0031
D5	0,1462	0,1014	0,0535	0,0269	0,0095	0,0042	0,0031

Dans les graphes suivants nous représenterons l'évolution de la viscosité dynamique de chaque huile vidangée séparément, puis elles sont suivies par un graphe qui regroupe les vidanges successives.

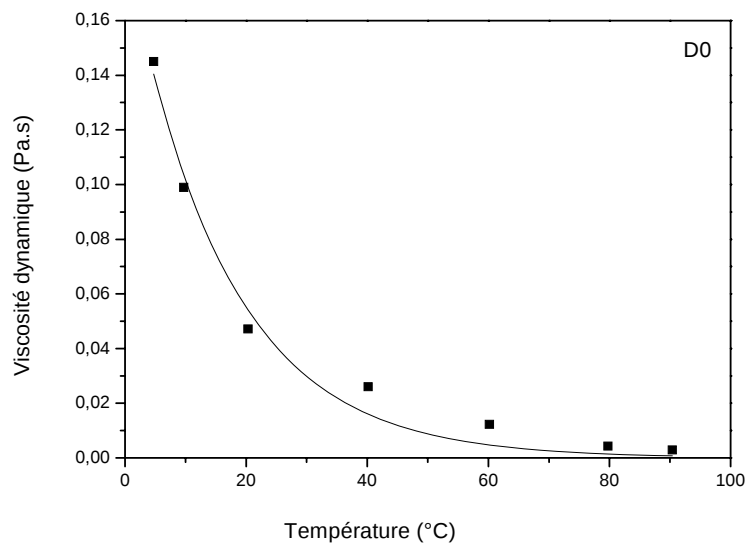


Figure 4.51: Evolution de la viscosité en fonction de la température (T°C)

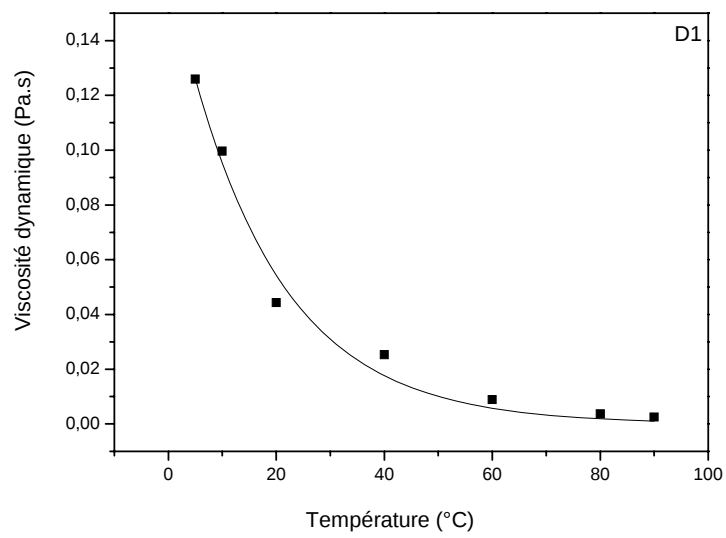


Figure 4.52: Evolution de la viscosité en fonction de la température (T°C)

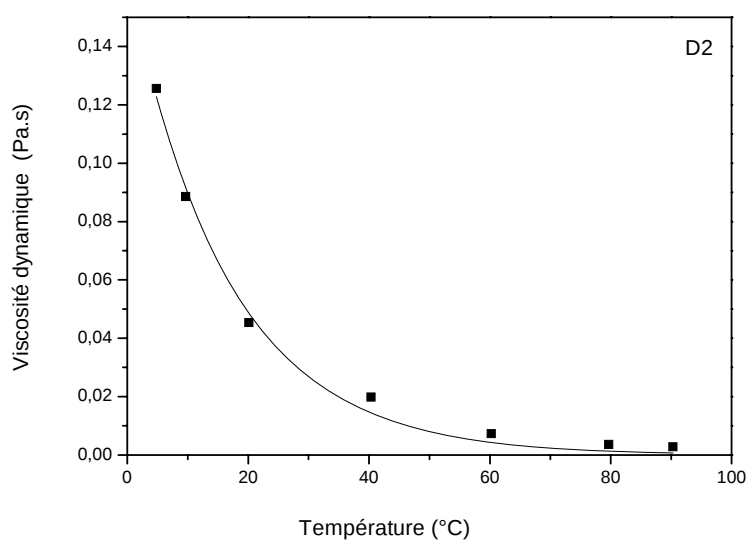


Figure 4.53: Evolution de la viscosité en fonction de la température (T°C)

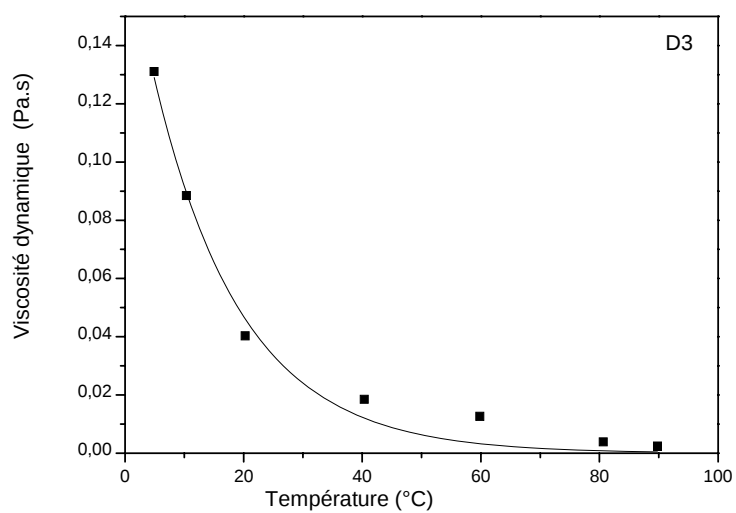


Figure 4.54: Evolution de la viscosité en fonction de la température (T°C)

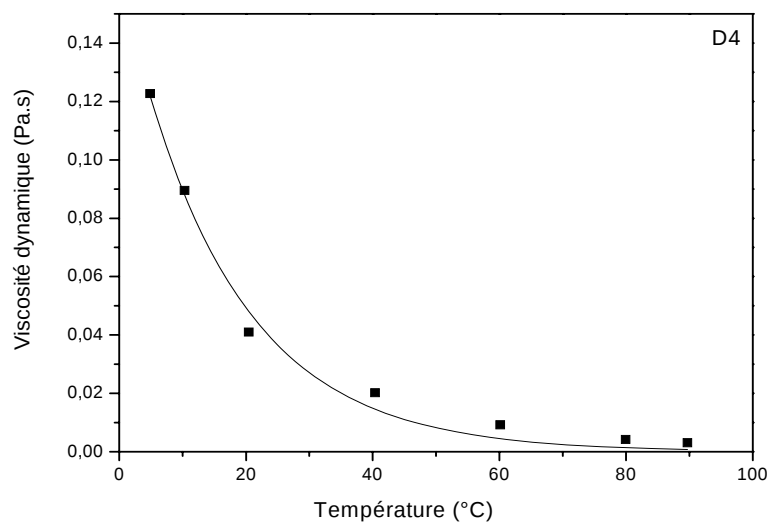


Figure 4.55: Evolution de la viscosité en fonction de la température (T°C)

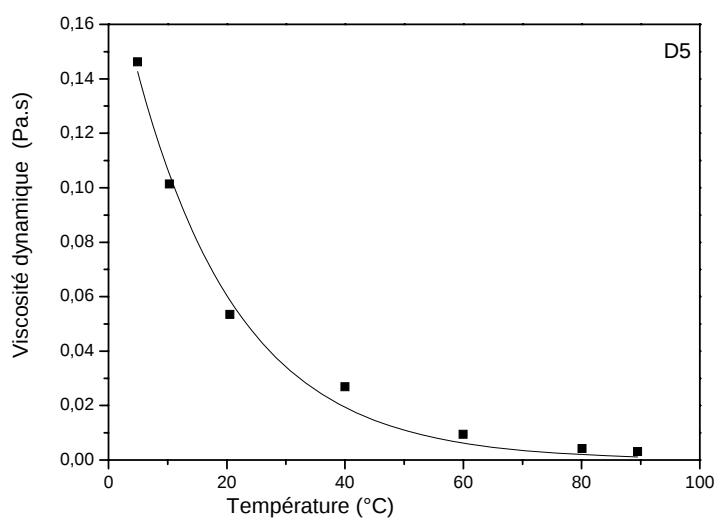


Figure 4.56: Evolution de la viscosité en fonction de la température (T°C)

Le graphe 4.57 regroupe les résultats des différents graphes (4.51), (4.52), (4.53), (4.54), (4.55) et (4.56).

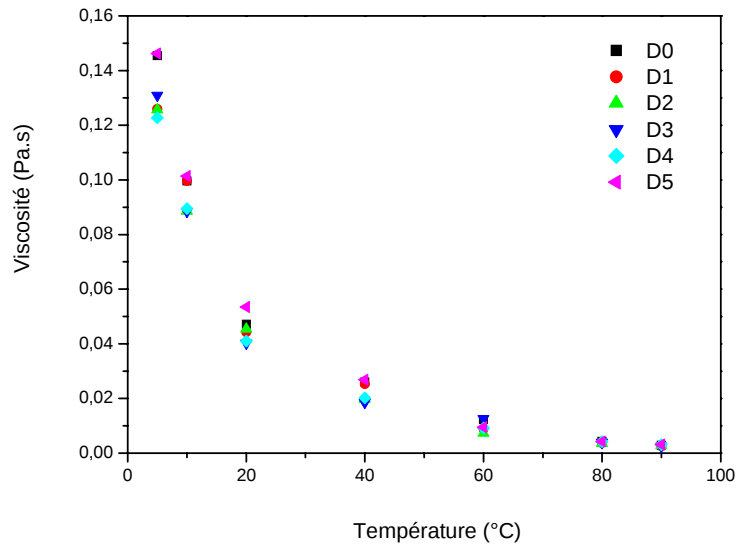


Figure 4.57: Evolution de la viscosité de toutes les vidanges Di en fonction de la température

Nous remarquons que quelque soit le nombre de kilomètres parcourus, et pour toute vidange Di, l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement garde la même allure. La viscosité diminue exponentiellement en fonction de la température. Elle décroît rapidement aux faibles températures puis garde pratiquement une valeur constante en hautes températures. On constate également que pour toutes les vidanges (figure 4.57) la viscosité garde pratiquement une valeur constante à hautes températures.

Les équations mathématiques décrivant l'évolution de la viscosité dynamique en fonction de la température pour chaque vidange Di sont les suivantes:

- Huile neuve D0 :
 $\tau_0 = 0,19409 \exp(-0,0632633T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,984
- Vidange D1 :
 $\tau_1 = 0,16699 \exp(-0,0561450T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,986
- Vidange D2 :
 $\tau_2 = 0,16746 \exp(-0,0612655T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,994
- Vidange D3 :
 $\tau_3 = 0,18144 \exp(-0,0691806T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,986

- Vidange D4 :
 $\tau_4 = 0,16558 \exp(-0,0621297T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,994
- Vidange D5 :
 $\tau_5 = 0,19014 \exp(-0,0585426T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,990

3.3.2.3 Evolution de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement

L'étude de la viscosité en fonction du taux de cisaillement nous permet de confirmer le comportement newtonien de l'huile étudiée. Pour toutes les températures étudiées, le comportement newtonien est enregistré. En effet, la viscosité est constante comme le montrent les courbes ci-dessous.

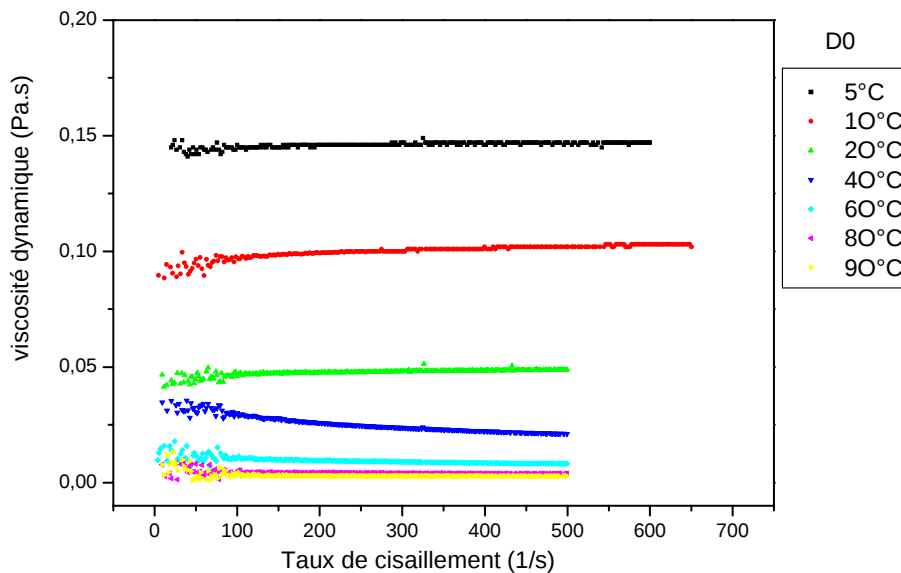


Figure 4.58: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

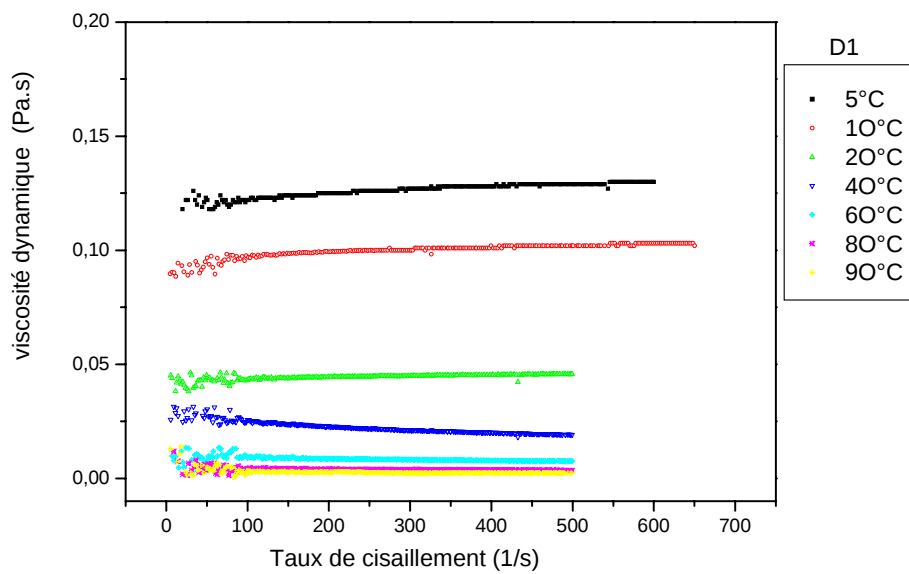


Figure 4.59: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

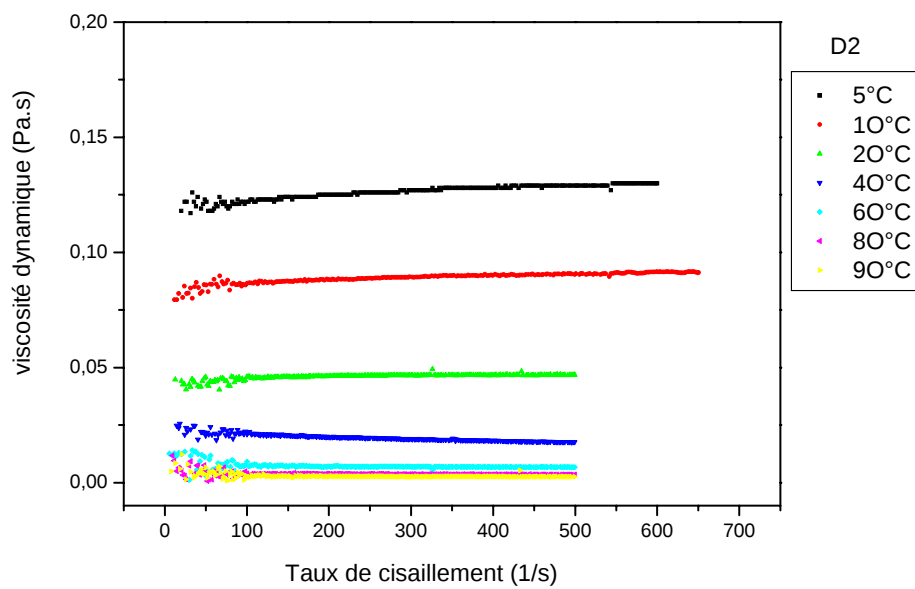


Figure 4.60: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

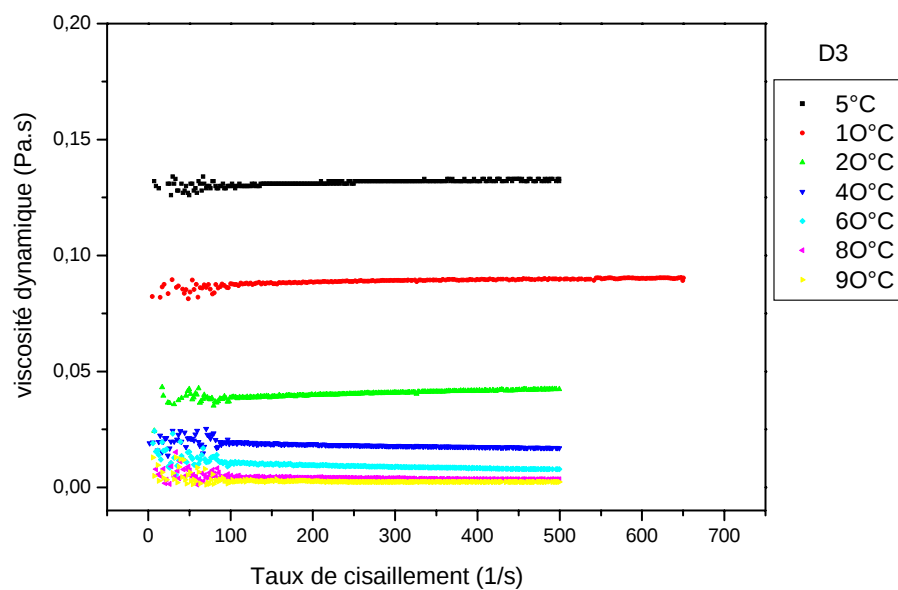


Figure 4.61: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

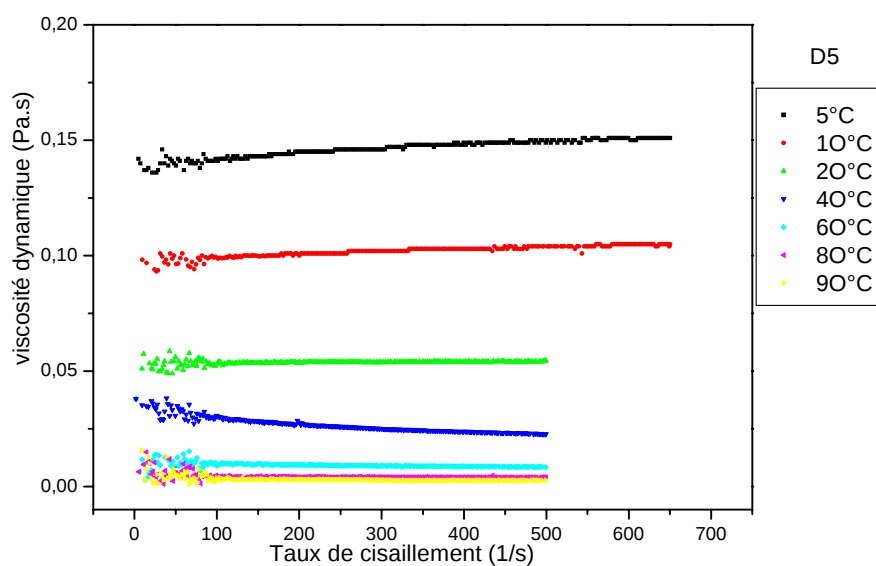


Figure 4.62: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

3.3.3 Mesure du TAN et TBN

Comme nous l'avons vu pour le lubrifiant "NAFTILIA SAE 20W50", le TBN indique la capacité des additifs à neutraliser les acides qui altèrent l'huile.

Par rapport à la valeur originelle du TBN dans l'huile neuve, nous observons que le TBN dans l'huile usée décroît de 16.56% à 8000 km comme le montre la figure 4.58 ci-dessous.

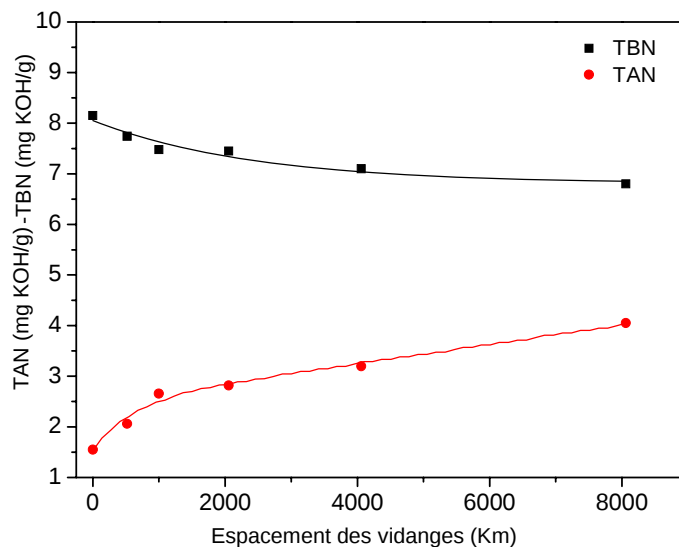


Figure 4.58: Variation du TAN et du TBN en fonction de l'espacement des vidanges

Comme nous l'avons déjà cité, l'augmentation TAN indique les réactions d'oxydation dans le lubrifiant ou sa contamination par des produits acides. La valeur du TAN dans l'huile usée, a doublé à environ 4000km. L'acidité est passée de 1,55mg KOH/g à l'état neuf jusqu'à 3,01 mg KOH/g à environ 4000km.

3.3.4 Mesure des cendres

Les cendres font partie des facteurs qui contribuent à la dégradation de la qualité des lubrifiants. Deux types de cendres ont été mesurés en fonction des espacements des vidanges comme le montre le tableau 4.11.

Tableau 4.11: Variation de cendres pour l'huile CHELIA VP SUPER SAE 20W40

Espacement des vidanges	Cendres sulfatées (%P)	carbone Conradson (%P)
D0	1,0033	1,1739
D1	1,0045	1,4285
D2	1,0084	1,4335
D3	1,0650	2,0033
D4	1,0831	2,0931
D5	1,1359	2,5923

Les chiffres du tableau 4.11 nous indiquent que la variation des cendres augmente en fonction des espacements des vidanges.

3.3.4.1 Cendres sulfatées

Comme ceci a déjà été mentionné, les cendres sulfatées résultent de la dégradation des additifs (leur calcination complète); nous constatons que plus l'espacement des vidanges s'agrandit plus le pourcentage des cendres augmente. Cette variation est représentée par le graphe 4.59.

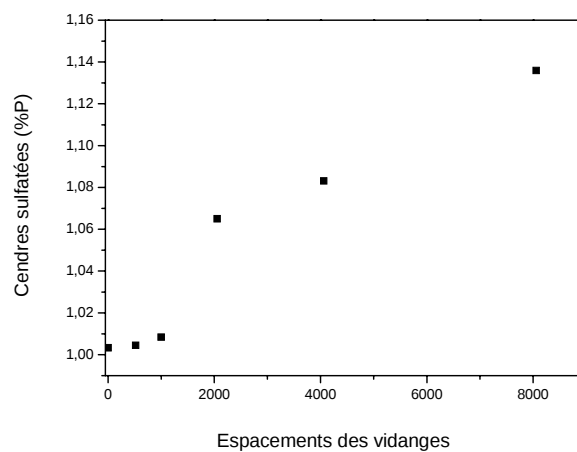


Figure 4.59 : Evolution des cendres sulfatées en fonction de l'espacement des vidanges

3.3.4.2 Carbone Conradson

Une huile de base portée à une température élevée en atmosphère confinée, pendant un temps assez long, se décompose thermiquement en laissant un résidu de coke plus ou moins abondant et friable.

Le pourcentage de carbone transformé en coke, est appelé "Résidu de Carbone Conradson". C'est une caractéristique intéressant principalement les huiles compresseurs et les fluides caloporteurs mais qui sert aussi à qualifier les huiles de base.

La variation du carbone Conradson en fonction des espacements des vidanges est traduite par le graphe suivant.

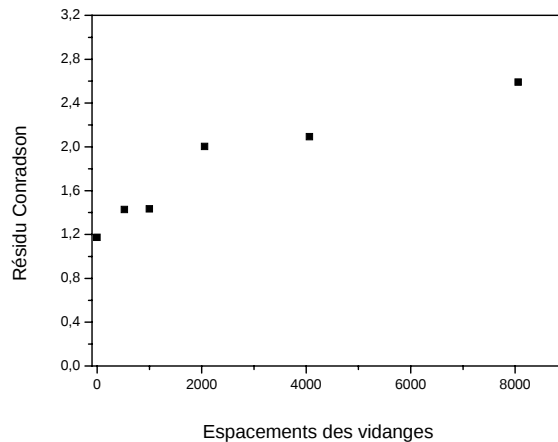


Figure 4.60 : Evolution du carbone Conradson en fonction de l'espacement

La figure 4.60 ci-dessus montre que le carbone Conradson augmente en fonction des espacements de vidanges. Cette augmentation peut être due à la présence dans l'huile usagée de résidus métalliques et de matières minérales pouvant provenir de poussières de l'air. Le carbone Conradson est une caractéristique qui peut nous renseigner sur l'état du moteur. Il donne les limites d'utilisation de l'huile en service. Au dessus d'un certain seuil (3%) en carbone Conradson, l'huile ne peut plus remplir son rôle et doit être éliminée.

3.3.5 Détermination de la teneur en éléments des lubrifiants

La détermination de la teneur en éléments (métalloïdes et métaux) contenus dans les lubrifiants permet, soit de vérifier la conformité du produit livré par rapport aux prescriptions du cahier des charges, soit de détecter, sur un lubrifiant usagé, une éventuelle erreur de remplissage ou d'appoint.

Tableau 4.12 Teneur en éléments dans l'huile moteur (ppm).

Vidanges	D0	D2	D3	D4	D5
Unité	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
Usure					
Fe	1.6	13.0	49.7	121	308
Cr	0.4	1.4	5.4	12.0	11.6
Cu	0.2	0.7	3.0	6.8	10.5
Sn	4.3	5.2	6.1	12.8	13.1
Al	1.6	5.5	14.2	33.4	49.5
Ni	0.0	0.2	2.7	6.9	7.6
Mo	126	140	140	173	158
Dopage					
B	0.4	0.6	0.6	0.7	1.0
Mg	293	90.3	83.3	34.6	24.8
Ca	1387	1448	1537	1705	1550
Ba	4.1	3.6	2.7	3.0	3.2
P	649	516	499	485	568
Zn	492	461	456	461	520
Polluants					
Si	11.6	11.3	19.6	39.9	154
Na	3.9	3.7	4.5	5.8	8.4

3.3.5.1 Détermination de la teneur en métaux d'usure

La détermination de la teneur en métaux d'usure contenus dans les lubrifiants en service permet de contrôler, soit l'état de pollution de l'huile en vue d'une vidange éventuelle, soit l'usure du mécanisme (moteur, transmission, circuit hydraulique).

Le tableau 4.12, nous permet de constater que les traces des métaux d'usure (Fe, Cr, Sn et Al) dépassent les concentrations des limites arrêtées. Ce qui se traduit par une présence élevée de traces de métaux dans le lubrifiant. Cette situation pourrait être le résultat de l'état d'un moteur endommagé.

En effet, pour l'élément fer la concentration limite est de 100ppm, cette valeur est dépassée dans la quatrième vidange (D4) à 4000km et a atteint 121 ppm et 308 ppm à environ 8000km.

De même pour le chrome (Cr) la limite de concentration est dépassée à la quatrième vidange ce qui correspond à 4000km.

Les concentrations de l'étain (Sn) et l'aluminium (Al) ont également dépassé les concentrations limites respectives.

3.3.5.2 Détermination de la teneur en éléments provenant des additifs

Les résultats des analyses sur les traces en éléments provenant des additifs nous montrent que les variations de la concentration de ces traces sont relativement stables sauf pour le magnésium, dont la variation apparaît très importante.

3.3.5.3 Détermination de la teneur en éléments provenant des polluants

On remarque que la teneur en silicium du lubrifiant à l'état neuf n'est pas négligeable. De plus, cette teneur a varié considérablement suivant les espaces des vidanges.

La variation des traces des polluants peut se traduire par l'introduction de poussières atmosphériques riche en silice.

Quant à l'augmentation de la teneur en élément sodium, elle n'est pas très importante. Elle pourrait éventuellement, s'expliquer par une pollution extérieure pouvant provenir du liquide de refroidissement.

Quant aux autres éléments cités dans le tableau, nous n'avons pas pu avoir les limites de concentrations, on ne peut se prononcer.

CHAPITRE IV

CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DES HUILES MOTEUR USAGEES

NAFTILIA SUPER SAE 20W50

Et

CHELIA VP SUPER SAE 20W40

INTRODUCTION

Ce chapitre porte sur l'étude concrète de deux lubrifiants NAFTILIA SUPER SAE 20W50 pour moteur automobile à essence et CHELIA VP SUPER 20W40 pour moteur diesel. A ce niveau, nous évoquerons la méthodologie appliquée pour l'analyse de l'évolution des caractéristiques de ces deux lubrifiants. Les résultats obtenus seront présentés et discutés.

1 METHODOLOGIE APPLIQUEE

1.1 Détermination de l'échantillon

Le choix des huiles à étudier a été déterminé en fonction de la fréquence de leur utilisation par les automobilistes. En effet, selon la société de commercialisation NAFTAL, les huiles NAFTILIA SUPER et CHELIA VP SUPER sont les plus vendues.

Il est à noter que pour ces deux lubrifiants, l'huile de base est produite localement et les additifs sont importés.

Les échantillons d'huile usagée étudiées proviennent de vidanges effectuées sur deux moteurs l'un à essence et l'autre diesel type RENAULT : Mégane 2003 et Kangoo 2006 respectivement (voir annexe B). Ces véhicules assurent un service quotidien à Alger et sa banlieue; ce qui impose aux moteurs et lubrifiants des conditions d'utilisation très sévères : démarrages à froid, fonctionnement au ralenti, accélération fréquente, etc.... Selon les renseignements obtenus par la société, les deux véhicules ont vu leurs conducteurs changer plusieurs fois (organisation interne à la société). Ils parcourent en moyenne 100 km par jour. La vitesse moyenne est de 80km/h. La durée du service journalier est de 05 heures et le véhicule est utilisé 06 jours par semaine.

L'analyse de ces échantillons prélevés périodiquement comprend la connaissance de son origine, ses propriétés physico-chimiques et son utilisation afin de suivre l'évolution de l'altération et de déceler des anomalies ayant des origines chimiques et mécaniques [5].

Cette analyse est comparable avec un examen de sang chez l'être humain. En effet, tout comme le sang, l'huile contient un certains nombre d'informations sur l'enveloppe dans laquelle elle circule [47].

Afin que les résultats ne soient pas biaisés, les précautions suivantes ont été prises lors des prélèvements:

- veiller à la propreté du contenant appelé à réceptionner l'huile de vidange.
- s'assurer que l'embout du contenant est propre avant de le refermer une fois plein.
- identifier le contenant en y apposant la date de vidange et la nature du lubrifiant.

1.2 Outils et normes d'analyses suivis

Pour définir les paramètres de qualité d'un lubrifiant, il est impératif de disposer d'outils nécessaires afin d'avoir des informations valables nous permettant de tirer éventuellement des conclusions intéressantes. Les laboratoires de l'université ne possédant pas ces outils, nous avons effectué nos analyses dans trois laboratoires différents: le laboratoire central de la société NAFTAL située à Dar El Beida, Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites (LMMC) de la faculté des sciences de l'ingénieur de l'université M'hamed Bougara à Boumerdès et laboratoire du Centre de Recherche et Développement (CRD) à Boumerdès.

Pour analyser les caractéristiques de nos prélèvements, nous avons suivi les classifications développées par l'organisme américain ASTM (American Society for Testing and Materials). Parmi les méthodes de suivi hors ligne, nous avons opté pour la méthode basée sur les analyses classiques, ou essais standard, cette méthode étant la seule disponible dans les laboratoires où nous avons mené nos tests.

1.3 Processus de suivi des deux lubrifiants

L'opération de « suivi des véhicules » a donc été effectuée pour observer la dégradation réelle du lubrifiant en continu. Pour atteindre notre objectif, qui est la connaissance de l'évolution voire des changements des caractéristiques du lubrifiant au cours de son utilisation, nous avons procédé à des vidanges totales, en prenant le soin de changer à chaque fois le filtre, puis de nouveau remplir le moteur avec une huile neuve du même stock préalablement préparé pour ce suivi¹. La vidange se déroulait au sein de la société NAFTAL, et l'huile récupérée est orientée vers le laboratoire central de la dite société située à Dar El Beida. Au départ, nous avons souhaité procéder à des vidanges avec des distances kilométriques plus ou moins régulières comme le précise le tableau 4.1, avec une particularité au début en prenant des distances plus rapprochées de façon à observer les premières variations et d'identifier les caractéristiques les plus sensibles.

¹ Un certain nombre de précautions ont été prises afin d'avoir des huiles identiques au niveau caractéristiques de départ.

Tableau 4.1: Distances initialement prévues pour les vidanges

Lubrifiant 20W50		Lubrifiant 20W40	
Distance à parcourir (Km)	Vidanges successives	Distance à parcourir (Km)	Vidanges successives
0	E0	0	D0
500	E1	500	D1
1000	E2	1000	D2
2000	E3	2000	D3
4000	E4	4000	D4
6000	E5	6000	D5
8000	E6	8000	D6
10000	E7	10000	D7
		12000	D8
		15000	D9

Malheureusement, ces distances kilométriques choisies pour notre analyse n'ont pas été respectées. En plus, nous avons été confronté à de multiples difficultés externes liées à la situation du service concerné par cette étude. Ces difficultés (tels que le non respect des vidanges selon les kilomètres proposés, déplacement des véhicules pour des missions, pannes répétées contraignant le véhicule à rester au garage pendant de longues durées, contraintes et retard pour l'obtention du matériel, le changement de direction ...), n'ont pas permis la réalisation du travail dans les conditions et les temps souhaités. Suite aux pannes répétées et longues du véhicule à moteur diesel, et vu la contrainte du temps, nous avons été amené à limiter ses vidanges à plus ou moins 8000km.

Cependant, malgré ce contexte difficile, grâce à la coopération et le concours de différents fonctionnaires du service, l'étude a pu être réalisée.

2 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU LUBRIFIANT "NAFTILIA SAE 20W50"

Pour mieux apprécier le degré de détérioration de l'huile en service, nous avons du, tout d'abord, procéder à l'établissement de la fiche signalétique de l'huile lubrifiante neuve SAE 20W50.

2.1 Caractéristiques physico-chimiques principales de l'huile neuve

Les principales caractéristiques physico-chimiques de l'huile neuve NAFTILIA SAE 20W50 pour moteur essence, que nous avons déterminées selon les normes ASTM, sont regroupées dans le tableau 4.2 :

Tableau 4.2: Caractéristiques physico-chimiques principales de l'huile neuve SAE 20W50

Caractéristiques	Huile Neuve SAE20W50	Normes ASTM
Masse volumique (kg/l) à 15°C	0,8807	D 1298
Viscosité à 40°C (cSt)	145,50	D 445
Viscosité à 100°C (cSt)	16,18	D 445
Indice de viscosité	118	D 2270
Point d'éclair Cleveland (v.o) (°C)	250	D 92
T.A.N (mgKOH/g)	1,81	D 664
T.B.N (mgKOH/g)	5,56	D 2896
Carbone Conradson (%P)	1,0765	D 189
Cendres Sulfatées (%P)	0,7270	D 874
Teneur en Cendres	0,5760	NF EN ISO 6245
Point d'Ecoulement (°C)	- 18	D 97
Teneur en soufre (%P)	0,2925	D 129

Nous tenons à signaler que l'huile utilisée dans le véhicule provient du même stock et une réserve suffisante a été mise de côté, pour garder les caractéristiques initiales et assurer un suivi correcte et fiable.

2.2 Caractéristiques physico-chimiques principales de l'huile usée

Nous avons réalisé une série d'essais normalisés sur des huiles prélevées selon les consignes déjà citées et aux fréquences des vidanges E_i ($0 \leq i \leq 7$) en fonction du nombre de kilomètres parcourus par le véhicule à moteur essence. Les résultats de l'analyse sont présentés dans le tableau récapitulatif 4.3. Ce dernier regroupe l'évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'huile en service par rapport aux caractéristiques de l'huile neuve de même catégorie.

Les mesures, comme nous pouvons le constater dans le tableau précédent, confirment que l'espacement des vidanges influence réellement la qualité de l'huile lubrifiante.

Les caractéristiques et les propriétés d'une huile, au cours de son service, subissent inévitablement des modifications dont l'évolution peut avoir une action sur le bon fonctionnement et la longévité du moteur.

2.3 Interprétation des résultats d'analyse

2.3.1 Viscosité cinématique:

La viscosité est une caractéristique importante des huiles neuves et usagées, mais pour ces dernières, elle est susceptible d'évoluer entre certaines limites, sans que pour autant la vie d'un moteur soit en danger. Il est souhaité une viscosité appropriée et efficace sur une large gamme de température [48].

La détermination de la viscosité cinématique a été réalisée, conformément aux recommandations de la norme ASTM D 445, à l'aide d'un appareil de marque TAMSON TCV 40. La méthode consiste à mesurer le temps d'écoulement d'une quantité de produit, à travers un viscosimètre (tube calibré). Ce dernier a été étalonné dans un laboratoire agréé qui remet un certificat donnant sa constante et son temps d'écoulement minimal. Le viscosimètre, chargé, est maintenu dans le bain environ 30 minutes pour que l'huile atteigne la température d'essai. Compte tenu des caractéristiques du viscosimètre, nous disposons d'une relation entre le temps d'écoulement et la valeur de la viscosité ν . La valeur de viscosité obtenue est la moyenne de deux déterminations.

$$\nu = Ct$$

Avec: C , la constante du viscosimètre utilisé,
 t , le temps d'écoulement observé en secondes.

Le dispositif expérimental est constitué d'un:

- Viscosimètre à capillaire;
- Support de viscosimètre;
- Bain thermostaté;
- Dispositif de mesure de la température;
- Chronomètre de précision.

Tableau 4.3: Evolutions des caractéristiques physico-chimiques de l'huile (20W50) en service avec l'espacement des vidanges

Symboles des différentes vidanges	Espacement des Vidanges (Km)	Masse volumique à 15°C (kg/l)	Viscosité à 40°C (cst)	Viscosité à 100°C (cst)	Indice de viscosité	Point éclair (v.o) (°C)	T.A.N (mgKOH/g)	T.B.N (mgKOH/g)	Point d'écoulement (°C)	Teneur en soufre (%P)
E0	0	0,8807	145,50	16,18	118	250	1,81	6,20	-18	0,2925
E1	684	0,8808	120,79	14,39	120	232	1,87	6,18	-18	0,3015
E2	1029	0,8799	121,20	14,60	123	228	1,98	6,13	-18	0,2944
E3	2131	0,8808	118,84	14,35	122	212	2,25	5,98	-18	0,2849
E4	4207	0,8841	112,59	13,61	119	184	2,68	5,56	-21	0,2795
E5	6825	0,8871	115,96	14,89	133	198	3,08	4,27	-18	0,2490
E6	8147	0,8885	117,56	17,52	165	202	3,57	3,05	-18	0,2503
E7	9761	0,8875	119,96	17,95	167	212	4,60	2,08	-18	0,2613

En cours de service, la viscosité d'une huile peut rester stable, augmenter ou diminuer.

Entre 0 et 4000km de service, la viscosité de l'huile diminue (figures 4.1 et 4.2). Cette diminution peut provenir d'une part de la dégradation des additifs d'indice de viscosité utilisés, et d'autre part, de la dilution de l'huile par le carburant. Une petite quantité de ce dernier peut avoir un effet sensible sur la chute.

Au-delà de 4000 km, nous assistons à une légère augmentation de la viscosité. Ceci est dû à la présence de produits d'oxydation et de matières charbonneuses. Ce phénomène l'emporte sur les effets de dilution sur le paramètre de viscosité de l'huile en service.

Il est important de souligner que des variations de la viscosité d'une huile usagée est en interaction avec les autres paramètres comme la concentration en matières charbonneuses, TAN, TBN, le point éclair, la masse volumique, etc.

En d'autres termes, les variations de la viscosité sont accompagnées par les variations des autres paramètres. L'augmentation de la viscosité aurait été appréciable si les autres grandeurs des autres paramètres restaient stables.

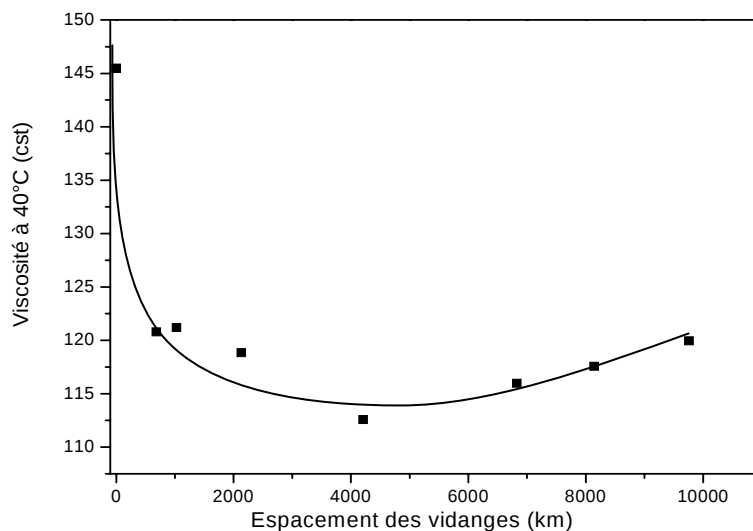


Figure 4.1: Variation de la viscosité à 40°C en fonction de l'espacement des vidanges

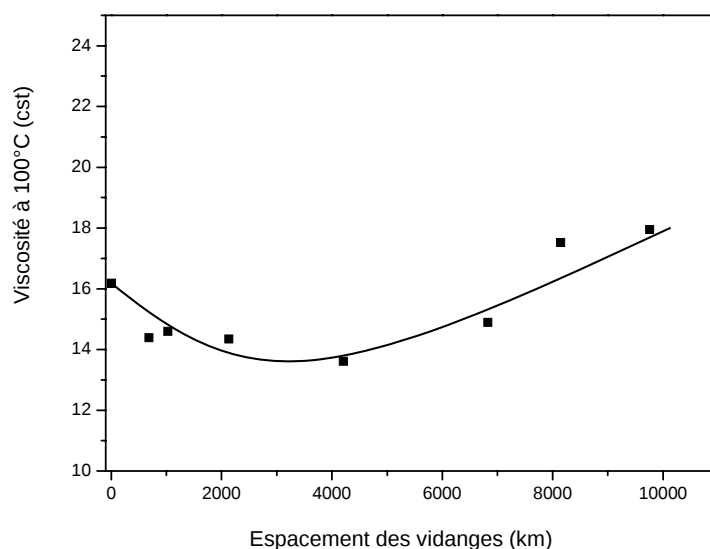


Figure 4.2: Variation de la viscosité à 100°C en fonction de l'espacement des vidanges

2.3.2 Indice de viscosité :

L'effet de la température sur la viscosité varie considérablement selon les différents types d'huile. Voilà pourquoi on a établi une norme qui mesure la viscosité en fonction de la température : il s'agit de l'indice de viscosité. Une huile à indice de viscosité élevé est une huile dont la viscosité change peu dans une plage de températures étendue. Aujourd'hui, grâce à de nouvelles méthodes de raffinage et à l'ajout d'additifs chimiques spéciaux, il existe plusieurs huiles moteurs à indice de viscosité élevé qui sont suffisamment légères pour faciliter le démarrage à basse température et suffisamment lourdes pour assurer un bon rendement à des températures élevées.

En cours d'usage, l'indice de viscosité varie, mais ses variations sont moins significatives que celles de la viscosité. Cependant, il est à noter que la précision de détermination de l'indice de viscosité est relativement faible (grande incidence des erreurs sur la viscosité, imprécision des abaques, etc.), d'où la prudence des conclusions à tirer de la détermination de cette caractéristique.

2.3.3 Etude rhéologique du lubrifiant

Des essais rhéométriques sur les différents échantillons d'huile prélevés aux vidanges successives nous ont permis de déterminer l'évolution des paramètres rhéologiques de l'huile étudiée.

2.3.3.1 Dispositif de mesure

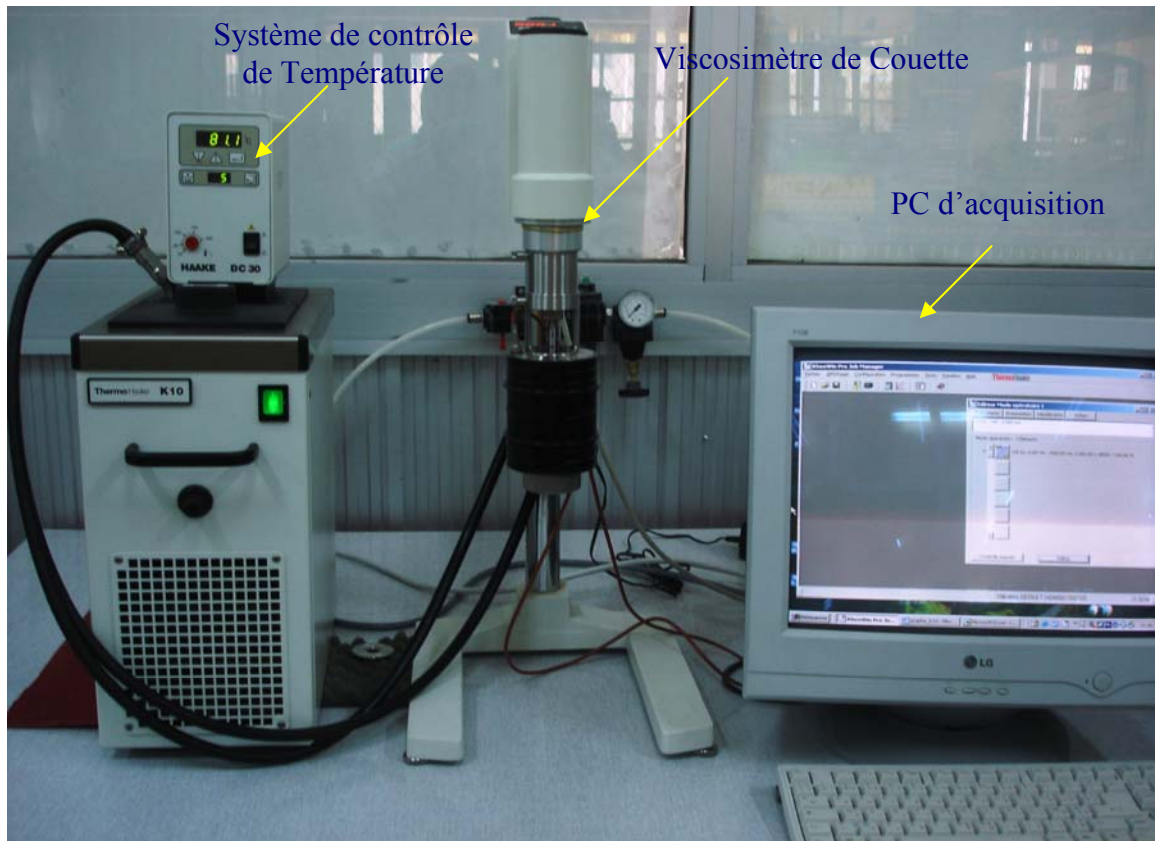
Les mesures de la viscosité dynamique ont été effectuées au sein du Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites (LMMC) de la faculté des sciences de l'ingénieur de l'université M'hamed Bougara à Boumerdès. Le viscosimètre utilisé est un modèle couette VT 550. Les caractéristiques des outils employés sont résumées dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4: Caractéristiques du rhéomètre

Viscosimètre	Caractéristiques
Couette	$R_e = 21,00 \text{ mm}$ $R_i = 19,36 \text{ mm}$ Hauteur cisailée = 58,08 mm Entrefer = 1,64 mm Volume de remplissage = 46,00 cm ³

R_e : rayon extérieur

R_i : rayon intérieur



Photographie N°1: Dispositif de mesure de la viscosité dynamique.

2.3.3.2 Principe du viscosimètre de Couette

Le principe de ce viscosimètre est le suivant :

Le fluide à tester est contenu dans un espace annulaire défini par un cylindre intérieur tournant (rotor) et un cylindre extérieur fixe (stator) (figure 4.3). Le rotor tourne à une vitesse définie et le couple résultant permet de mesurer avec précision la viscosité du fluide. Lorsque le régime est permanent, la contrainte $\tau(r)$ en tout point de l'espace annulaire est donnée par :

$$\tau(r) = \frac{M}{2\pi r^2 L}$$

où M est le moment du couple exercé sur le cylindre tournant et L la longueur des cylindres.

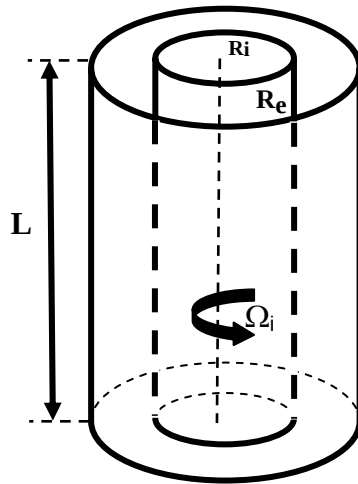


Figure 4.3 : Schéma d'un viscosimètre de type Couette

Cependant, le calcul du gradient de vitesse, $r \frac{d\omega}{dr}$, nécessite la connaissance de la loi de répartition de la vitesse angulaire. Or, cette répartition est fonction des propriétés rhéologiques du matériau. On est donc en présence d'un cercle vicieux : pour déterminer le comportement rhéologique, il serait nécessaire de le connaître préalablement. En effet, le cisaillement peut être considéré dans ce cas comme constant en tout point du fluide. Les deux hypothèses précédentes (cisaillement constant, entrefer étroit) conduisent à :

$$\dot{\gamma} = \frac{R_i \Omega_i}{R_i - R_e}$$

Il est ainsi possible, à partir de la mesure du couple M et de la vitesse de rotation Ω_i , d'accéder à la contrainte τ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$. La représentation de $\text{Log}(\tau)$ en fonction de $\text{Log}(\dot{\gamma})$ permet de déduire les caractéristiques rhéologiques du fluide.

2.3.3.3 Conduite des expériences au viscosimètre

On place le fluide à tester dans le dispositif de mesure et on le thermostatise à la température désirée. Une fois l'équilibre thermique atteint, on effectue un rhéogramme qui est le tracé des points $(\tau, \dot{\gamma})$.

2.3.3.4 Rhéologie du lubrifiant SAE 20W50

Des essais ont été effectués sur des échantillons prélevés à différentes vidanges E0, E1, E2,

E3, E4, E5, E6 et E7. En effet, chaque échantillon est introduit dans le viscosimètre où il est soumis à une série de température. Les résultats sont regroupés, sur les rhéogrammes des figures (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9), (4.10) et (4.11).

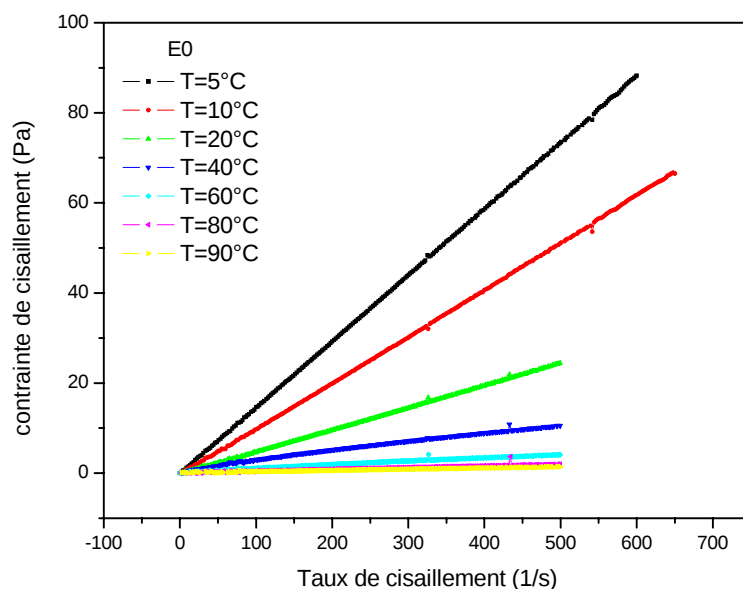


Figure 4.4: Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour l'huile neuve E0

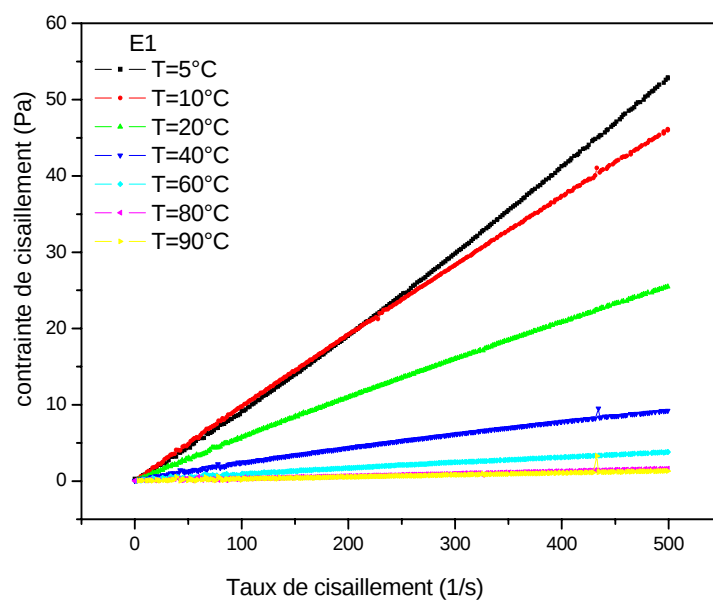


Figure 4.5: Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange E1

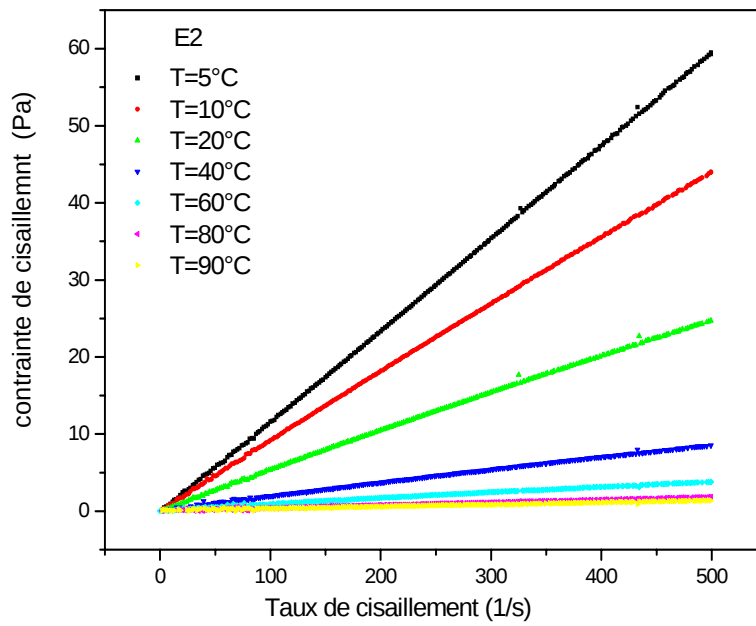


Figure 4.6: Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange E2

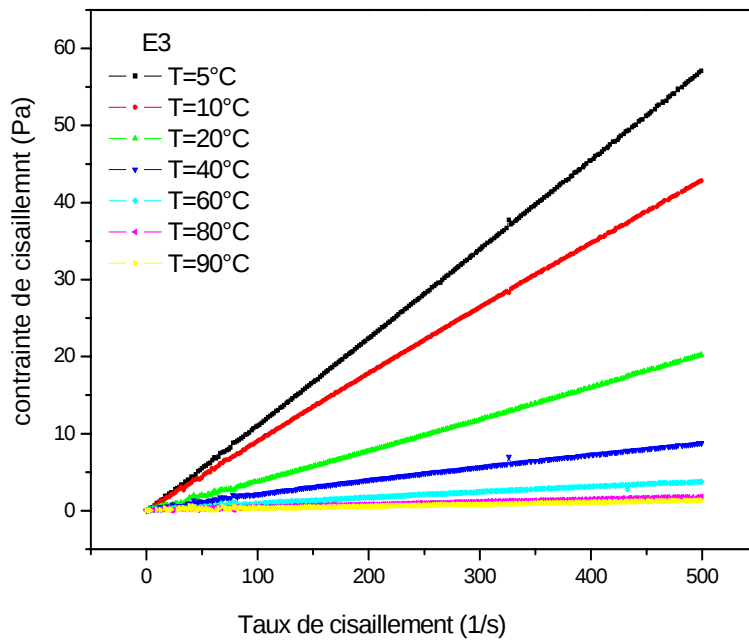


Figure 4.7 : Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange E3

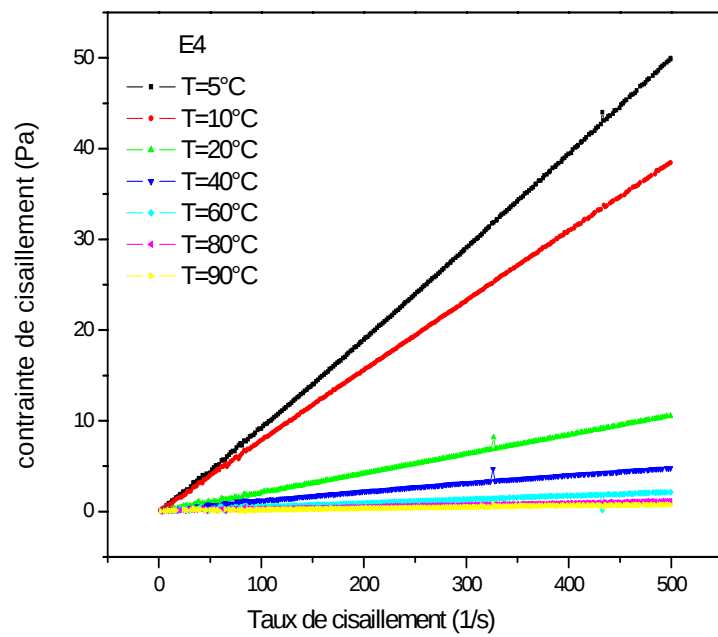


Figure 4.8 : Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange E4

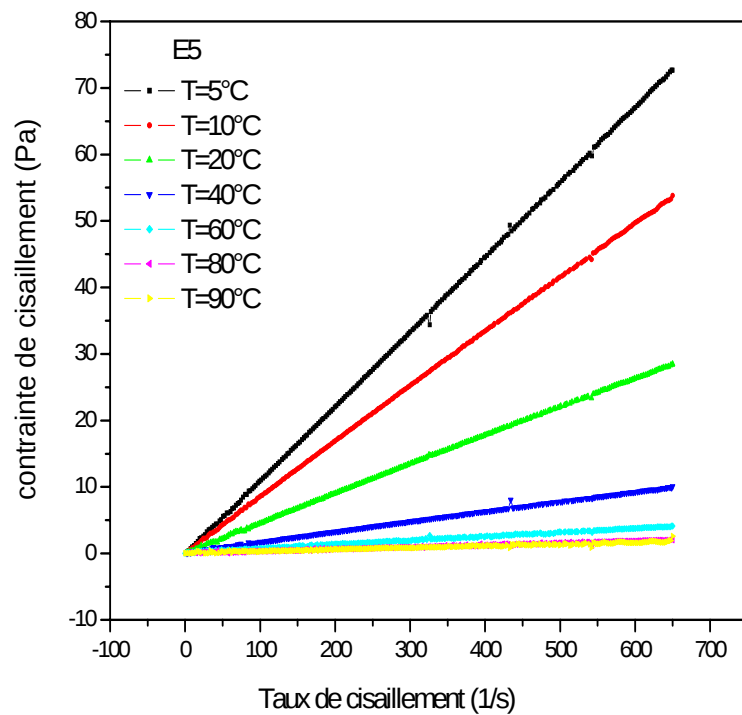


Figure 4.9 : Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange E5

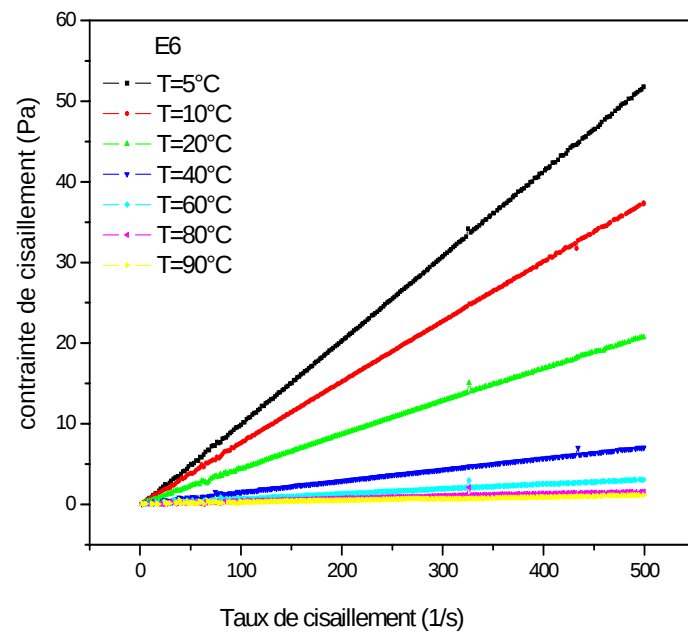


Figure 4.10 : Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange E6

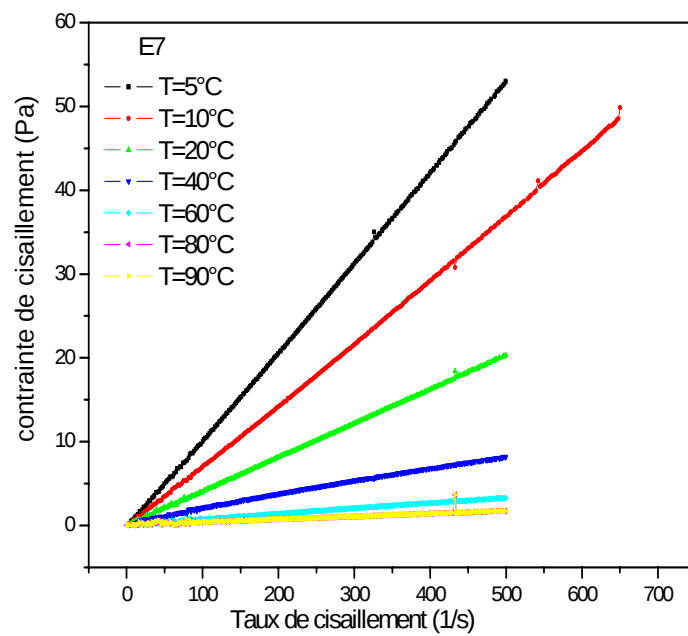


Figure 4.11 : Evolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour la vidange E7

Comme nous pouvons le constater, pour toutes les vidanges, les courbes obtenues sont des droites. Ces droites impliquent que le fluide est newtonien, c'est-à-dire qu'à chaque température, la viscosité dynamique est constante.

Nous constatons également que pour les températures allant de 5°C à 60°C, les courbes sont distinctes, par contre pour les "hautes" températures allant de 60°C à 90°C, nous observons que, quelque soit la valeur du taux de cisaillement, la valeur de la contrainte de cisaillement reste invariable ce qui est représenté par les trois droites pratiquement confondues (à 60°C, 80°C et 90°C). Ceci suppose que le taux de cisaillement n'a pas d'incidence sur la viscosité dynamique pour les hautes températures. Ces dernières semblent constituer le facteur dominant dans la dégradation du lubrifiant par rapport au facteur taux de cisaillement.

2.3.3.5 Evolution de la viscosité dynamique en fonction de la température

A partir des valeurs expérimentales τ_i (contrainte imposée) et $\dot{\gamma}_i$ (taux de cisaillement correspondant), on détermine la viscosité dynamique en fonction de la température pour les différentes vidanges.

Le tableau 4.5 regroupe les différentes viscosités dynamiques des différentes vidanges aux températures indiquées suivi des courbes relatives à chaque prélèvement.

Tableau 4.5: Variation de la viscosité avec la température pour l'huile 20W50

T(°C) Vidanges	5°C	10°C	20°C	40°C	60°C	80°C	90°C
E0	0,1544	0,0899	0,0556	0,0175	0,0076	0,0039	0,0030
E1	0,1179	0,0952	0,0545	0,0246	0,0087	0,0032	0,0027
E2	0,1164	0,0899	0,0516	0,0186	0,0085	0,0038	0,0029
E3	0,1114	0,0879	0,0391	0,0198	0,0087	0,0039	0,0028
E4	0,0952	0,0776	0,0210	0,0111	0,0046	0,0024	0,0016
E5	0,1102	0,0838	0,0447	0,0161	0,0098	0,0031	0,0029
E6	0,0952	0,0755	0,0433	0,0148	0,0065	0,0035	0,0024
E7	0,1020	0,0717	0,0406	0,0192	0,0070	0,0038	0,0026

Dans les graphes suivants on représentera l'évolution de la viscosité dynamique de chaque huile vidangée séparément, puis elles sont suivies par un graphe qui regroupe les vidanges successives.

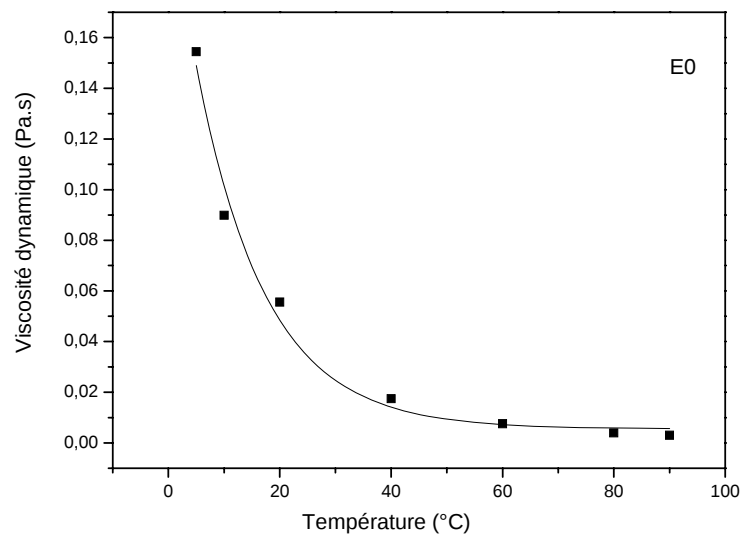


Figure 4.12: Evolution de la viscosité de l'huile neuve E0 en fonction de la température (T°C)

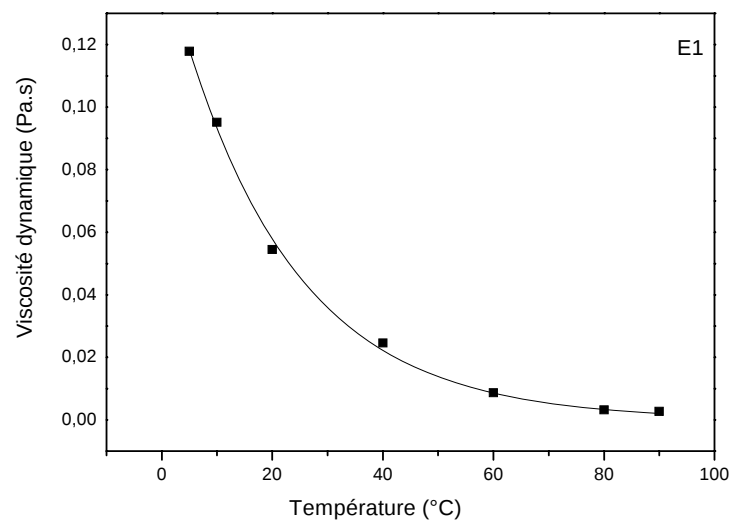


Figure 4.13 : Evolution de la viscosité de la vidange E1 en fonction de la température (T°C)

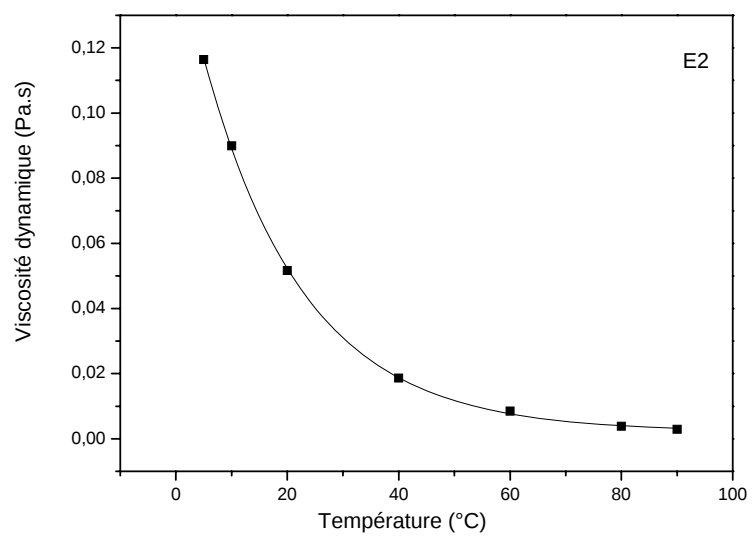


Figure 4.14: Evolution de la viscosité de la vidange E2 en fonction de la température (T°C)

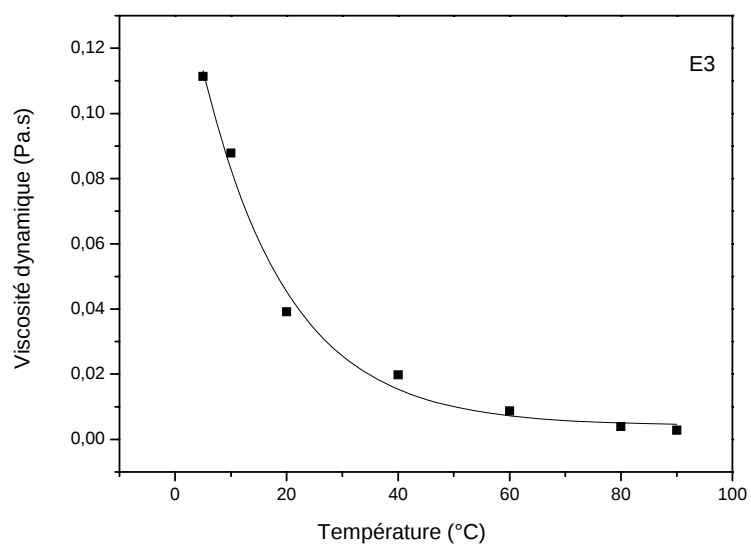


Figure 4.15: Evolution de la viscosité de la vidange E3 en fonction de la température (T°C)

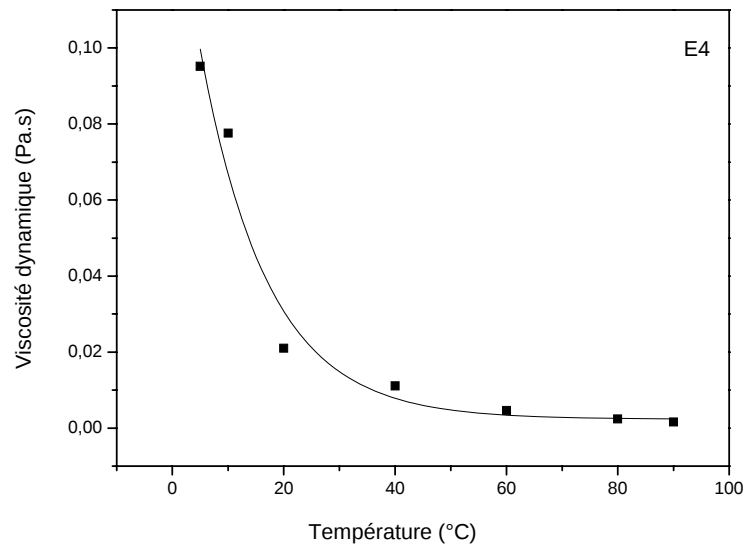


Figure 4.16: Evolution de la viscosité de la vidange E4 en fonction de la température (T°C)

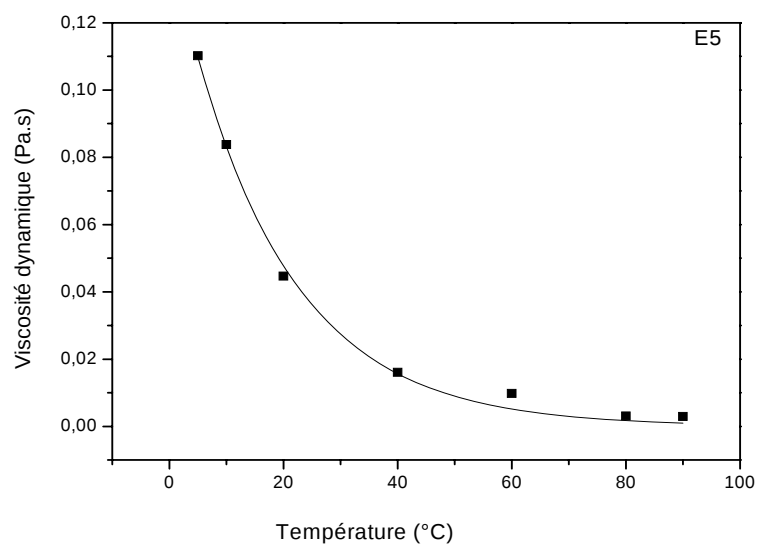


Figure 4.17: Evolution de la viscosité de la vidange E5 en fonction de la température (T°C)

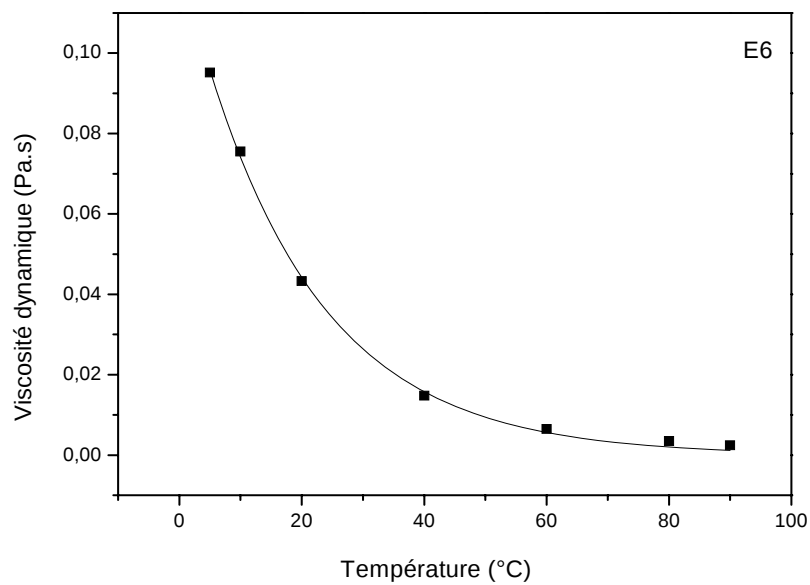


Figure 4.18: Evolution de la viscosité de la vidange E6 en fonction de la température (T°C)

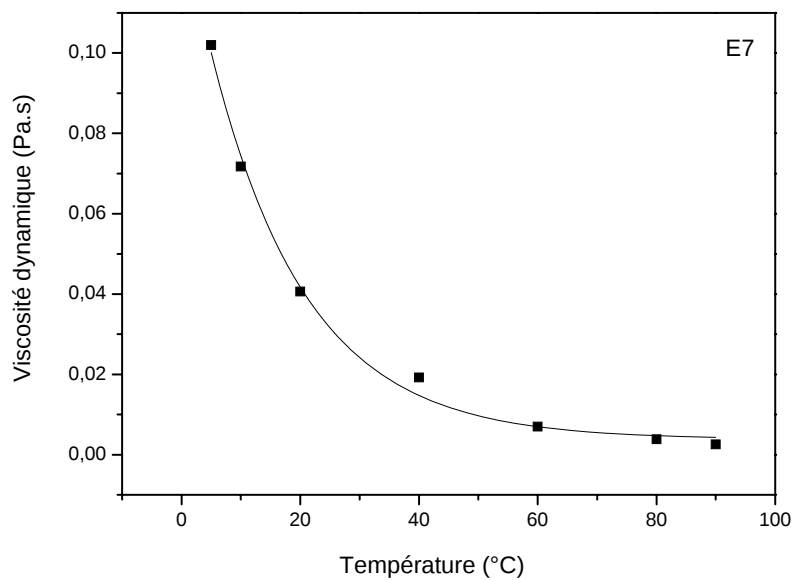


Figure 4.19: Evolution de la viscosité de la vidange E7 en fonction de la température (T°C)

Le graphe 4.19 regroupe les résultats des différents graphes (4.12), (4.13), (4.14), (4.15), (4.16), (4.17), (4.18) et (4.19).

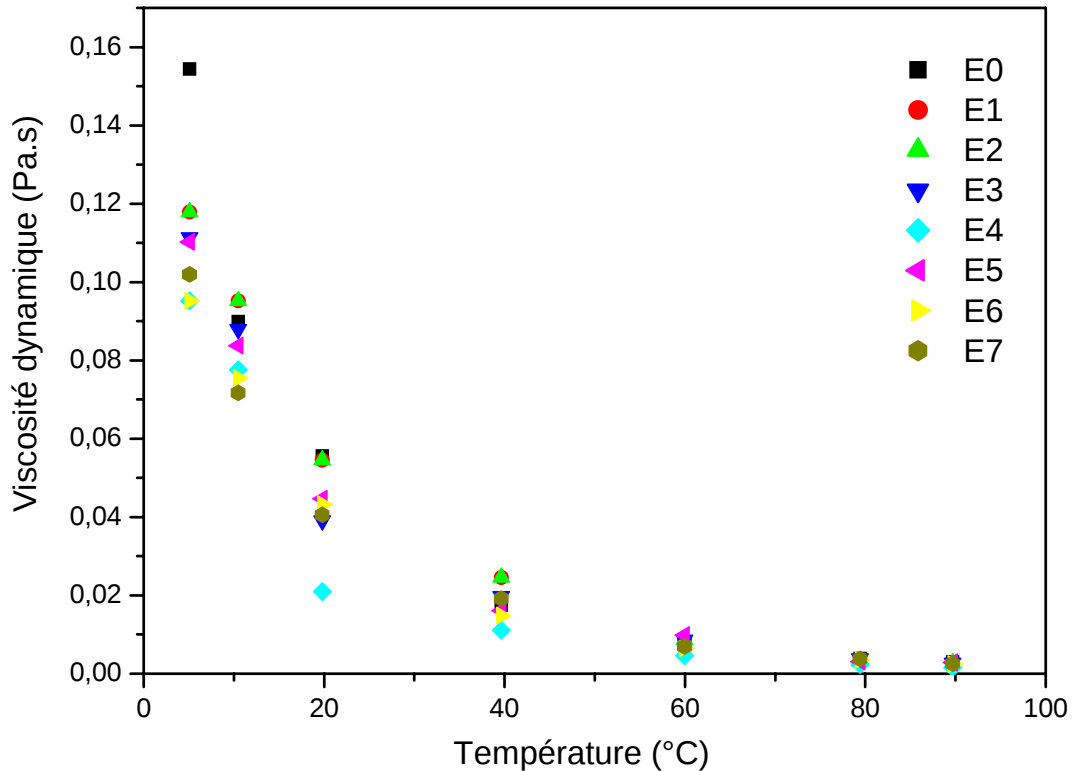


Figure 4.20: Evolution de la viscosité des vidanges Ei en fonction de la température

Nous remarquons que quelque soit le nombre de kilomètres parcourus, et pour toute vidange Ei, l'évolution de la viscosité dynamique en fonction de la température garde la même allure. La viscosité diminue exponentiellement en fonction de la température. Elle décroît rapidement aux faibles températures puis garde pratiquement une valeur constante en hautes températures. On constate également (figure 4.20) que la viscosité garde pratiquement une valeur constante à hautes températures.

Les équations mathématiques décrivant l'évolution de la viscosité dynamique en fonction de la température pour chaque vidange Ei sont les suivantes:

- Huile neuve E0 :
 $\tau_0 = 0,20992 \exp(-0,0709405T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,983
- Vidange E1 :
 $\tau_1 = 0,15018 \exp(-0,477107T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,998

- Vidange E2 :
 $\tau_2 = 0,15074 \exp(-0,0521366T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,999
- Vidange E3 :
 $\tau_3 = 0,14926 \exp(-0,0576256T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,988
- Vidange E4 :
 $\tau_4 = 0,14596 \exp(-0,0771660T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,971
- Vidange E5 :
 $\tau_5 = 0,14596 \exp(-0,0771660T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,996
- Vidange E6 :
 $\tau_6 = 0,124 \exp(-0,0515473T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,998
- Vidange E7 :
 $\tau_7 = 0,12984 \exp(-0,0545793T)$ avec un coefficient de corrélation égale à 0,992

2.3.3.6 Evolution de la viscosité dynamique en fonction du taux de cisaillement

L'étude de la viscosité en fonction du taux de cisaillement nous permet de confirmer le comportement newtonien de l'huile étudiée. Pour toutes les températures étudiées, le comportement newtonien est enregistré. En effet, la viscosité est constante comme le montrent les courbes ci-dessous.

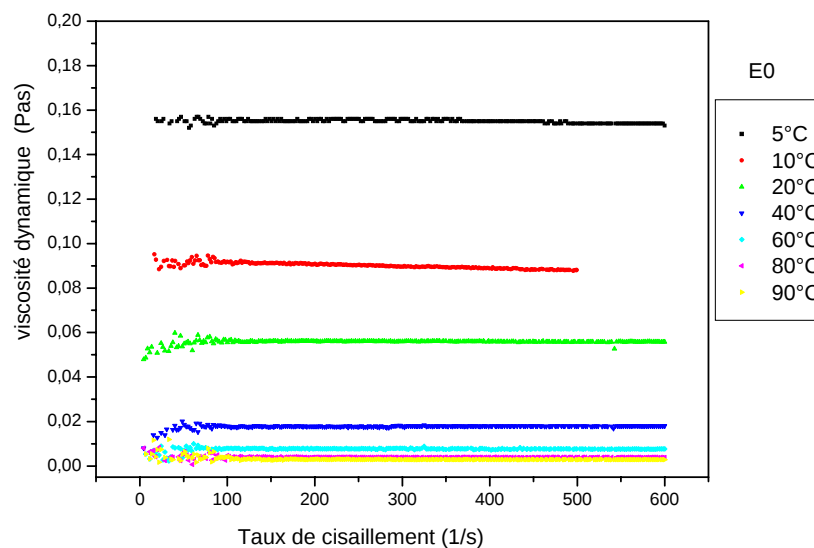


Figure 4.21 : Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

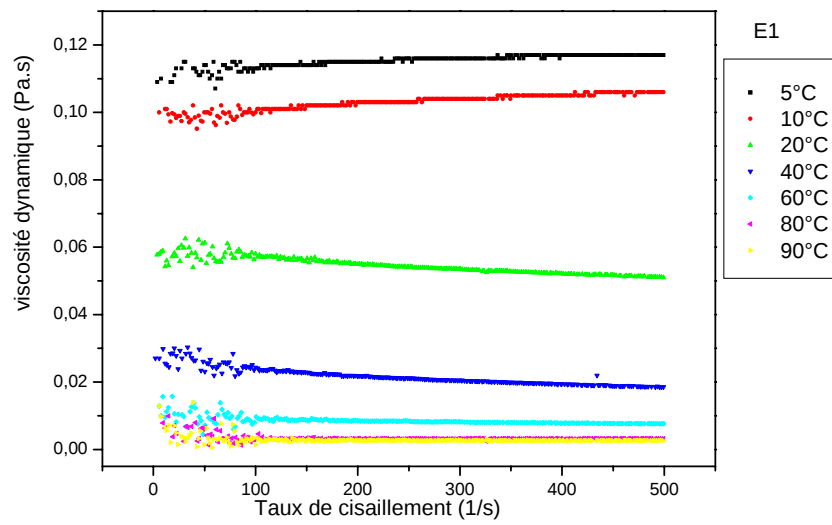


Figure 4.22: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

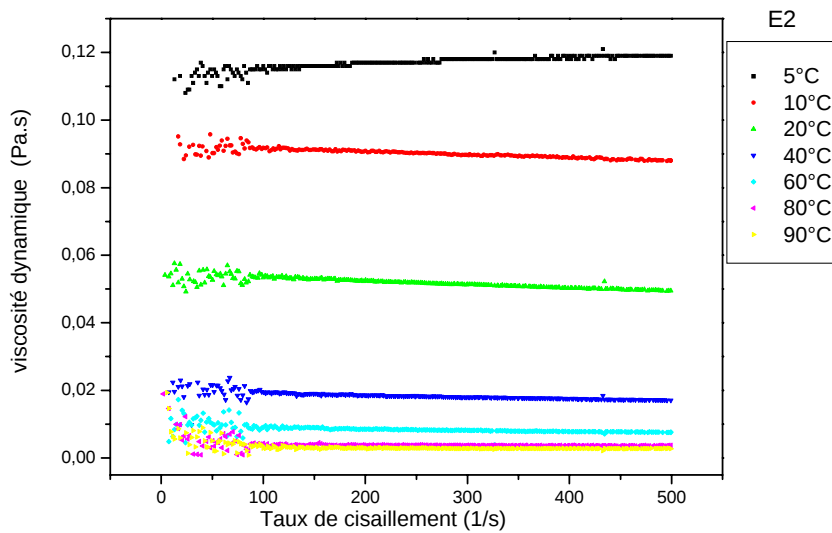


Figure 4.23: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

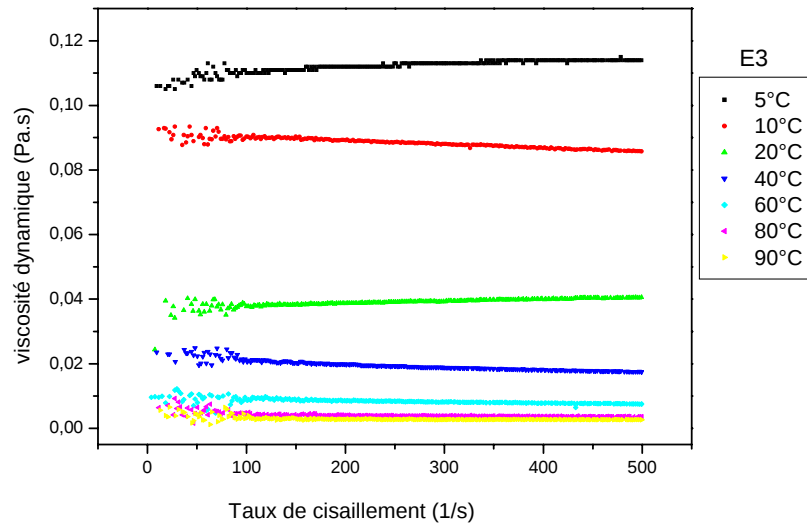


Figure 4.24: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

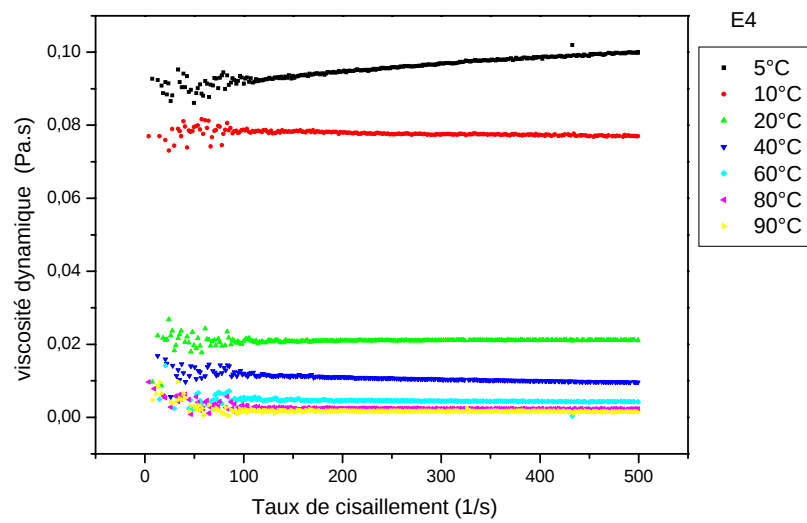


Figure 4.25: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

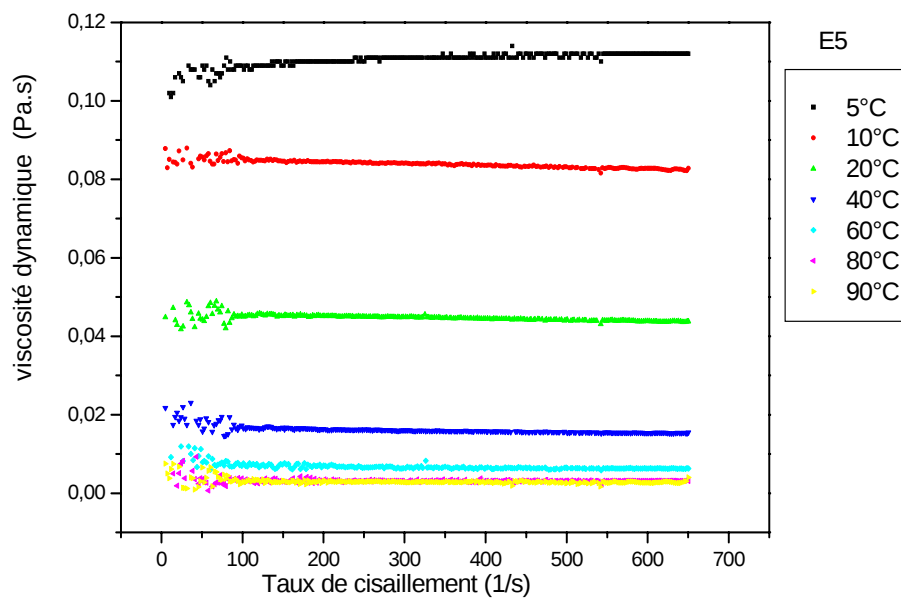


Figure 4.26: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

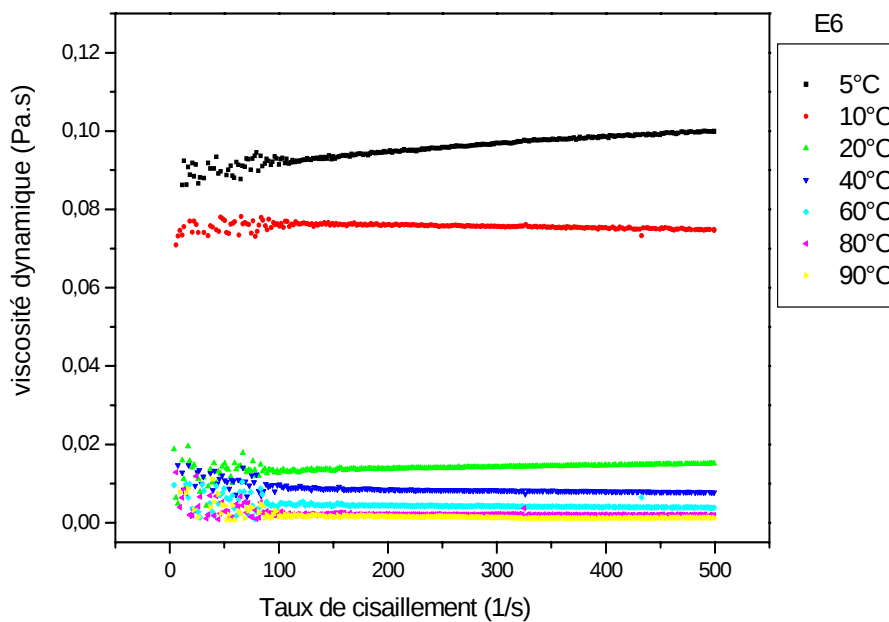


Figure 4.27: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

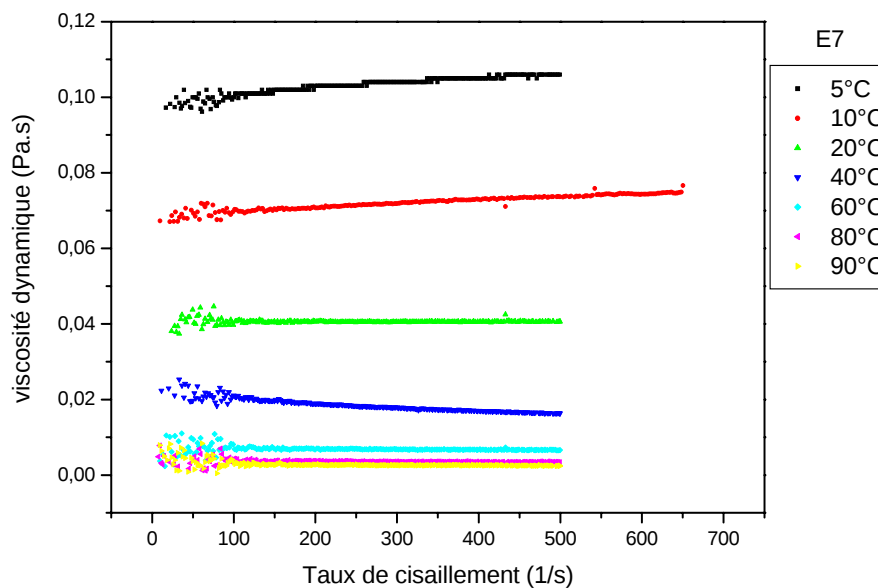


Figure 4.28: Evolution de la viscosité μ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$

2.3.4 Mesure du TAN et TBN

La mesure du TBN nous renseigne sur l'efficacité du lubrifiant à remplir son rôle. Plus précisément, le TBN indique la capacité des additifs à neutraliser les acides qui altèrent l'huile. Le calcium et le magnésium sont des additifs mélangés à l'huile de base pour assurer la neutralisation des acides. La neutralité des acides est maintenue tant que les niveaux, calcium et magnésium dans l'huile restent importants. Les mesures de TBN sont fréquemment utilisées pour prédire la vie restante de l'huile moteur [49]. Ainsi, la mesure du TBN constitue le seul moyen qui nous renseigne sur l'efficacité des additifs. En effet, avec l'utilisation, les additifs perdent de leur efficacité d'empêcher des dépôts de s'accumuler sur les pièces critiques du moteur. Les contaminants peuvent changer la viscosité de l'huile, empêchant ainsi la lubrification appropriée. La suie, la saleté, le cambouis, et les produits d'oxydation rendent l'huile trop épaisse [50].

Par rapport à la valeur initiale du TBN dans l'huile neuve, nous observons que le TBN dans l'huile usée décroît de 10.3% à 4000 km et décroît jusqu'à 66.6% à 10000km comme le montre la figure 4.29.

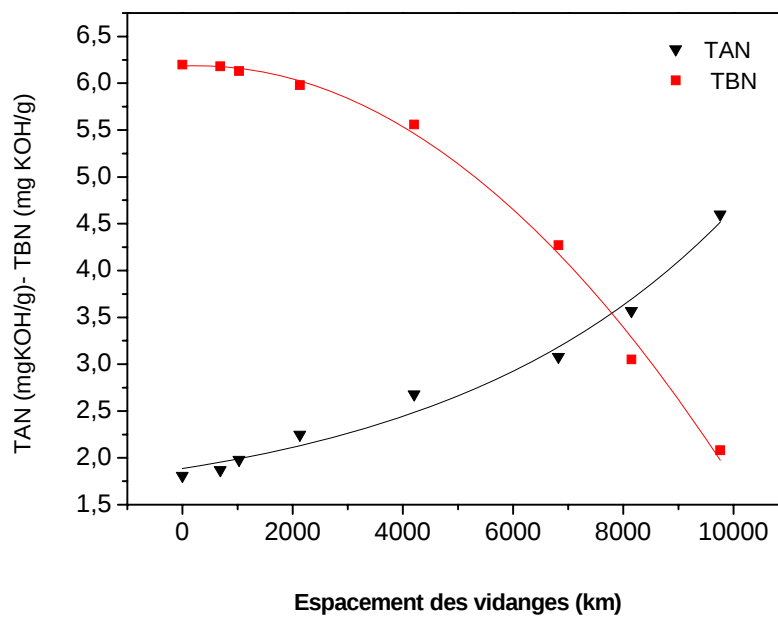


Figure 4.29: Variation du TAN et du TBN en fonction de l'espacement des vidanges

Quant au TAN, son augmentation indique, normalement, l'oxydation du lubrifiant ou sa contamination par des produits acides. Une huile neuve contient une très faible quantité de l'acide provenant des ajouts de certains additifs, pour son développement, lors de sa conception.

Nos observations ont permis de constater que la valeur du TAN a doublé au point de contrôle 8000km, elle est passée de 1,81 à 3,56.

2.3.5 Mesure de cendres

Les cendres font partie des facteurs qui contribuent à la dégradation de la qualité des lubrifiants. Deux types de cendres ont été mesurés en fonction des espacements des vidanges comme le montre le tableau 4.6.

Tableau 4.6: Variation de cendres pour l'huile NAFTILIA SAE 20W50

Espacement des vidanges	Cendres sulfatées (%p)	Carbone conradson (%p)
E0	0,7270	1,0765
E1	0,7538	1,2029
E2	0,8962	1,2067
E3	0,8978	1,2270
E4	0,8953	1,4140
E5	0,7734	1,4592
E6	0,7615	1,6196
E7	0,7391	1,6468

Les valeurs du tableau 4.6 nous indiquent que la variation des cendres évolue différemment selon la nature des cendres.

2.3.5.1 Cendres sulfatées

La teneur en cendres d'une huile est le pourcentage en masse du résidu recueilli après calcination complète de l'échantillon dans des conditions bien déterminées.

Les huiles de base pure ne donnent pas de cendres, alors que les additifs constitués de sels organométalliques conduisent, par calcination complète, à la formation de cendres contenant, par exemple du calcium, du magnésium, du zinc, etc.

Les cendres sulfatées résultent de la dégradation des additifs; nous constatons que plus l'espacement des vidanges s'agrandit plus le pourcentage des cendres augmente et ce jusqu'à un espacement de 2131km (E3). A partir de 4207km (E4) les chiffres ont tendance à diminuer. Cette variation est représentée par le graphe 4.30.

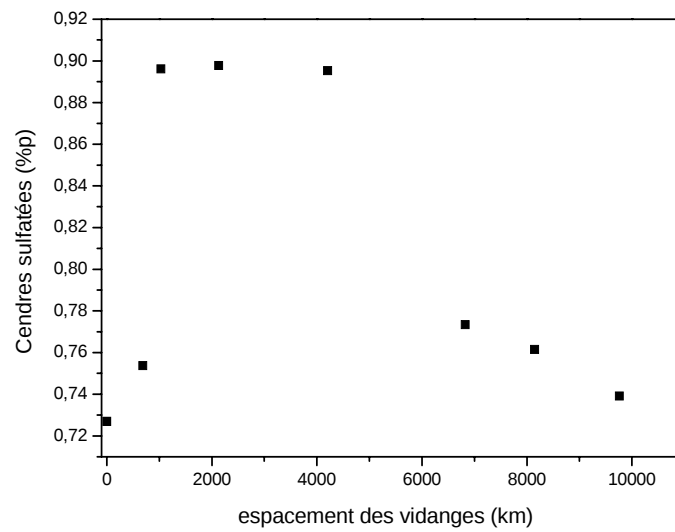


Figure 4.30 : Evolution des cendres sulfatées en fonction de l'espacement des vidanges

2.3.5.2 Carbone Conradson

La variation du carbone Conradson en fonction des espacements des vidanges est traduite par la figure 4.31.

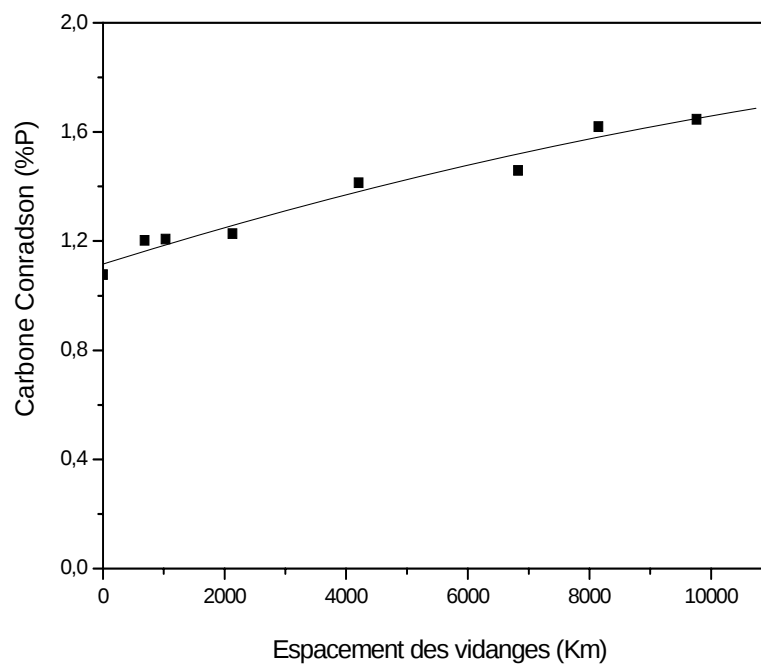


Figure 4.31 : Evolution du Carbone Conradson en fonction de l'espacement des vidanges

Le graphe 4.31 montre que le carbone Conradson augmente en fonction des espacements des vidanges. Cette augmentation est due à la présence dans l'huile usagée de résidus métalliques et de matières minérales pouvant provenir de poussières de l'air. Le carbone Conradson est une caractéristique qui peut nous renseigner sur l'état du moteur. Il donne les limites d'utilisation de l'huile en service. Au dessus d'un certain seuil (3%) en carbone Conradson, l'huile ne peut plus remplir son rôle et doit être éliminée.

2.3.6 Détermination de la teneur en éléments des lubrifiants

Pour affiner cette caractérisation, nous avons procédé à la détermination de la teneur en trace de métaux (métaux d'additivation, d'usure et polluants) [51].

La détermination de la teneur en éléments (métalloïdes et métaux) contenus dans les lubrifiants permet, soit de vérifier la conformité du produit livré par rapport aux prescriptions du cahier des charges, soit de détecter, sur un lubrifiant usagé, une éventuelle erreur de remplissage ou d'appoint, soit une défaillance de certains organes du moteur.

Dans notre recherche, cette détermination a été effectuée, au laboratoire du Centre de Recherche et de Développement (CRD) à Boumerdès, à l'aide d'un appareil appelé « SPECTROIL M » dans lequel est appliquée la technique de l'électrode à disque rotatif (RDE). L'analyse spectrométrique d'huile est applicable à tout système de lubrification en circuit fermé, comme les moteurs à essence et diesel. Le spectromètre analyse l'huile pour détecter les métaux d'usure provenant des composants en mouvement, des contaminants provenant de l'environnement et des dégradations des additifs. Les résultats, comparés aux différentes analyses précédentes ou aux limites établies, peuvent indiquer une usure normale ou les premiers signes d'un bris potentiel qui permet une action corrective avant qu'il n'y ait des dommages.

La méthode consiste à analyser un petit échantillon via l'électrode tournante où un arc électrique se crée entre l'électrode disque et l'électrode baguette. Ainsi, est émis un rayonnement électromagnétique, composé de longueurs d'ondes caractéristiques correspondant aux différents éléments présents dans l'échantillon.

Les différents résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 4.7.

Pour une huile neuve, huile n'ayant pas encore servi, nous devrions retrouver uniquement les métaux dits d'additivation.

Tableau 4.7: Teneur en en éléments du lubrifiant NAFTILIA SAE 20W50.

Vidanges	E0	E2	E3	E4	E5	E6	E7
Unité	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
Usure							
Fe	0.9	2.3	3.2	5.1	12.9	11.6	13.3
Cr	0.2	0.2	0.3	0.3	0.7	0.7	0.8
Cu	0.1	0.4	0.6	1.2	2.9	2.2	2.6
Sn	2.8	2.8	3.7	3.2	4.3	3.4	4.2
Al	1.4	1.5	2.1	2.2	5.0	4.2	4.7
Ni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.6
Additives							
B	40.9	29.3	27.1	23.8	21.6	19.5	18.8
Mg	320	264	268	265	274	273	254
Ca	731	1015	1038	1047	694	829	657
Ba	3.3	2.2	3.0	2.5	3.4	1.8	3.3
P	66.1	633	648	564	470	461	428
Zn	491	571	601	573	468	490	451
Polluants							
Si	4.2	4.3	3.6	4.0	3.4	3.3	3.3
Na	2.5	2.4	2.5	2.5	2.1	2.8	2.7

Les métaux et métalloïdes présents dans l'huile neuve sont ceux qui entrent dans la composition des additifs ajoutés aux huiles de base. Nous rappelons qu'ils représentent 10 à 20% du lubrifiant.

- les dialkyldithiophosphates de zinc ou DTPZn (additifs antioxydants),
- les sulfonates de calcium et de magnésium (additifs antirouille, additifs détergents et dispersants),
- le phosphore entrant dans la composition des additifs antirouille.

La comparaison entre l'analyse faite sur l'huile neuve et celle effectuée sur l'huile à différentes périodes de son séjour dans un moteur, donne la possibilité de suivre l'évolution des conditions mécaniques du moteur, de déceler toute usure anormale et par la même d'en rechercher les causes afin d'y pallier plus facilement et d'éviter ainsi une catastrophe mécanique.

Avec un moteur bien rodé, fonctionnant correctement, bien entretenu et utilisant une huile adaptée, l'usure de ses différents organes est progressive et se traduit par une évolution régulière et constante des concentrations en métaux dans les échantillons d'huile usagée prélevés à intervalles réguliers.

Les éléments les plus communément déterminés sont notamment, le fer, le chrome, le cuivre, l'aluminium l'étain, la silice et le bore.

Les résultats de ces analyses sont en fait beaucoup plus significatifs par leur évolution que par leurs valeurs absolues.

Des constructeurs et des grands utilisateurs américains ont publié des listes indiquant les limites de concentrations maximales des différents éléments d'usure. Ces limites sont représentées dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8: concentrations maximales des différents éléments

Eléments	Fer (Fe)	Chrome (Cr)	Cuivre (Cu)	Etain (Sn)	Aluminium (Al)	Bore (B)
Teneur en p.p.m	100	10	20	10	25	20

Les résultats de nos analyses n'ont pas dépassé les limites de concentration maximales ci-dessus, ce qui suppose que l'huile en service remplit encore son rôle de lubrifiant même à plus ou moins 10000 km.

Les différentes traces de métaux proviennent soit de l'usure du moteur, soit des additifs, soit des polluants.

2.3.6.1 Détermination de la teneur en métaux d'usure

Détermination de la teneur en Fer :

Nous représentons dans le graphe 4.32, les variations de la teneur en Fer en fonction de l'espacement des vidanges.

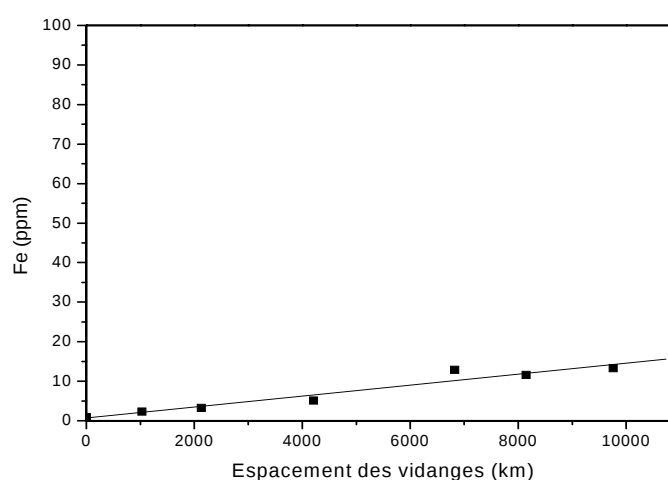


Figure 4.32: évolution des traces de Fe en fonction des espacements des vidanges

La courbe obtenue nous indique une légère augmentation de la teneur en fer (Fe), due le plus souvent à une usure des cylindres et des segments. Elle est à associer, avec la teneur en chrome dans le cas des segments chromés.

Les niveaux élevés en fer indiquent l'usure des vilebrequins, des soupapes, des chemises de cylindre et des paliers.

Détermination de la teneur en chrome Cr:

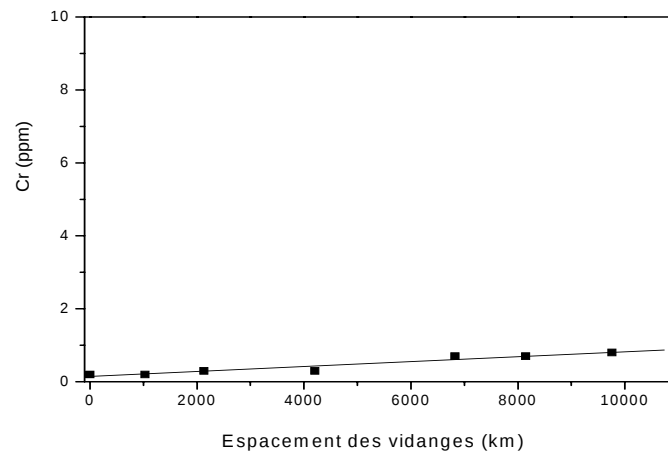


Figure 4.33: Evolution des traces de Cr en fonction des espacements des vidanges

Les résultats montrent qu'à 10000 km, notre huile est encore dans les limites des concentrations valides.

Détermination de la teneur en cuivre Cu

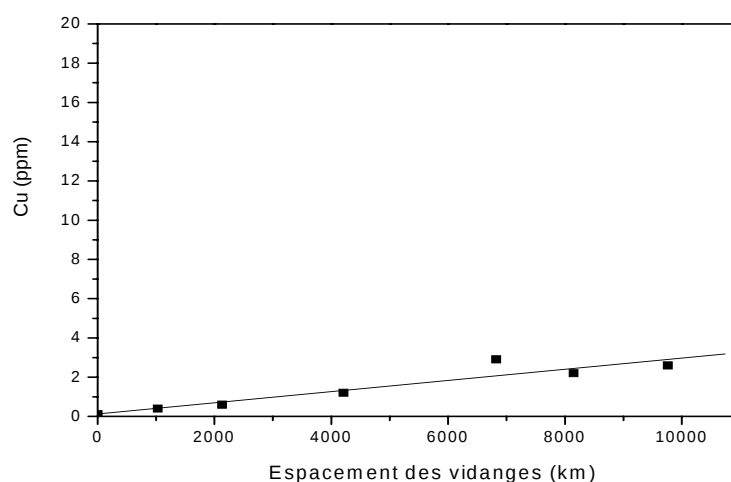


Figure 4.34: Evolution des traces de Cu en fonction des espacements des vidanges

Pour le cuivre, nous relevons aussi une légère augmentation qui reste dans les limites valables.

Les niveaux élevés en cuivre (Cu) indiquent l'usure des paliers et des bagues.

Une grande augmentation de la teneur en cuivre et en étain est indicative d'une usure excessive de coussinets fabriqués à base de cuivre ou d'étain.

Détermination de la teneur en aluminium Al

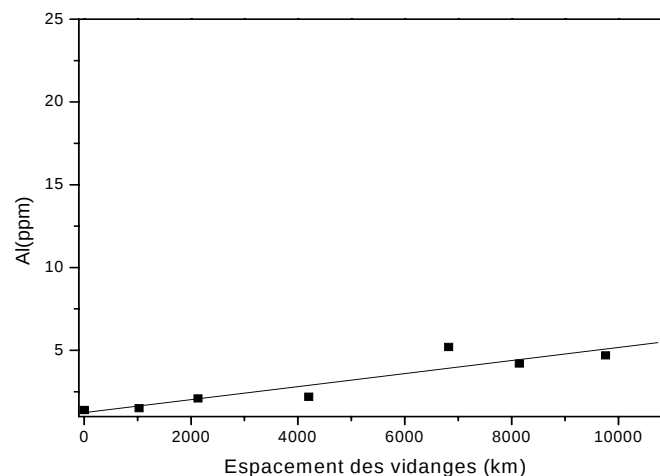


Figure 4.35: Evolution des traces de Al en fonction des espacements des vidanges

Egalement, l'évolution des traces de métaux reste dans les limites de concentrations.

L'augmentation de la teneur en aluminium peut être la conséquence d'un grippage des pistons.

Détermination de la teneur en étain Sn

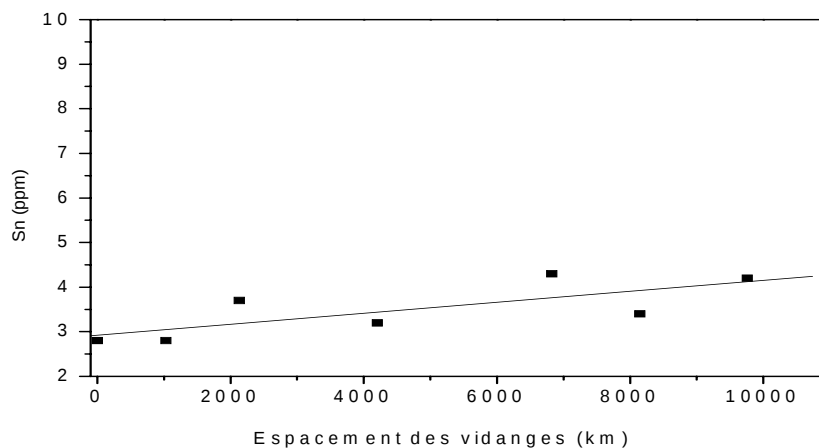


Figure 4.36: Evolution des traces de Sn en fonction des espacements des vidanges

Il apparaît clairement sur la figure 4.36 que les limites de concentrations ne sont pas atteintes. Les niveaux élevés en étain (Sn) par contre indiqueraient l'usure des bagues.

2.3.6.2 Détermination de la teneur en éléments provenant des additifs

Les résultats des analyses sur les traces de métaux provenant des additifs nous montrent que les variations de la concentration de ces traces sont relativement stables comme le montre les différents graphes ci-dessous.

Pour le bore:

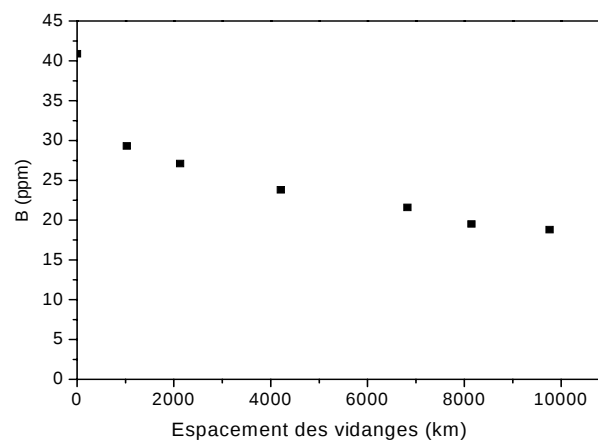


Figure 4.37: Evolution des traces de B en fonction des espacements des vidanges

Les changements qui apparaissent sur le graphe ne sont pas significatifs. L'évolution de l'élément bore reste elle aussi dans les limites de concentration.

Un niveau élevé en bore indiquerait l'introduction de liquide de refroidissement. Certaines huiles contiennent un agent dispersant au bore.

Pour le zinc

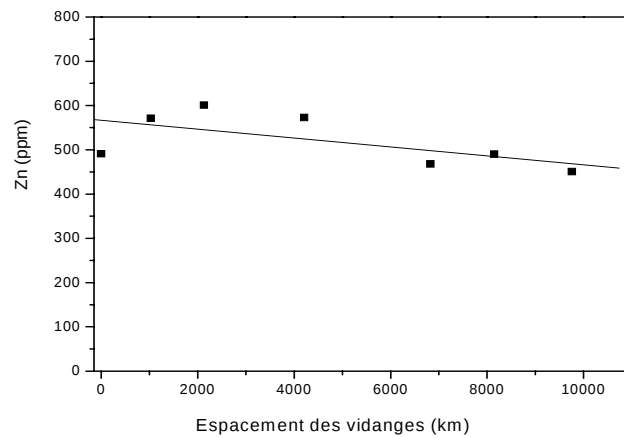


Figure 4.38: Evolution des traces de Zn en fonction des espacements des vidanges

Pareil aux autres traces de métaux, le zinc reste dans les limites des concentrations. Il fait partie des additifs qui ralentissent la propagation de la réaction d'oxydation.

Pour le magnésium

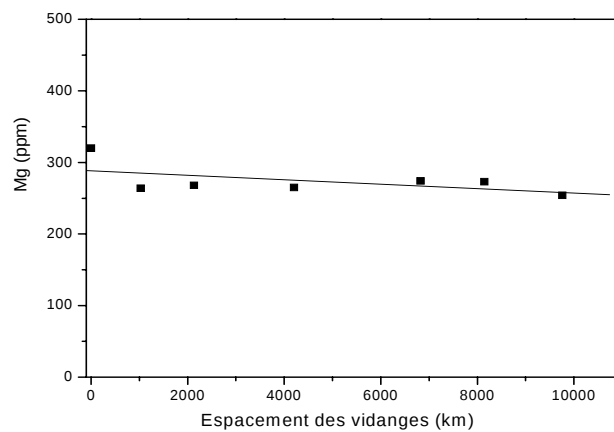


Figure 4.39: Evolution des traces de Mg en fonction des espacements des vidanges

L'évolution du magnésium, au même titre que le zinc, reste relativement stable et intervient comme additifs antioxydants.

Pour le calcium

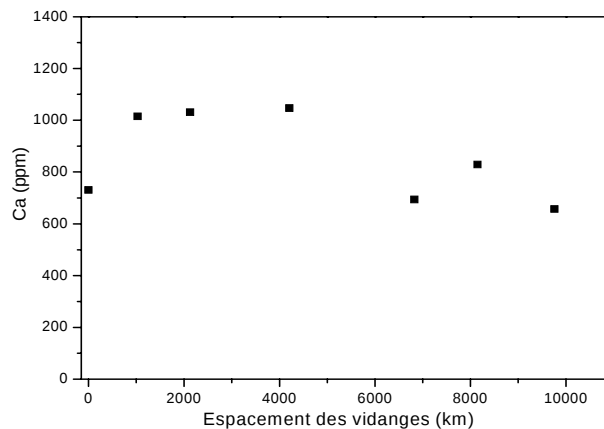


Figure 4.40: Evolution des traces de Ca en fonction des espacements des vidanges

L'évolution des traces du calcium reste relativement constante et intervient aussi comme antioxydant.

2.3.6.3 Détermination de la teneur en éléments provenant des polluants

Pour le sodium

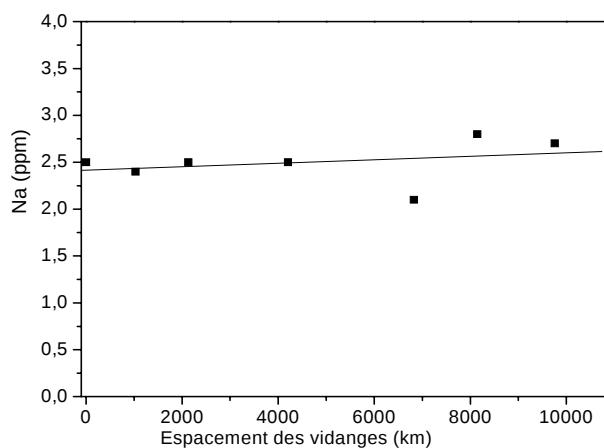


Figure 4.41: Evolution des traces de Na en fonction des espacements des vidanges

La quantité de l'élément sodium reste pratiquement stable à environ 10000 km. Une augmentation de l'élément sodium indiquerait une éventuelle pollution extérieure provenant du liquide de refroidissement.

Pour le silicium

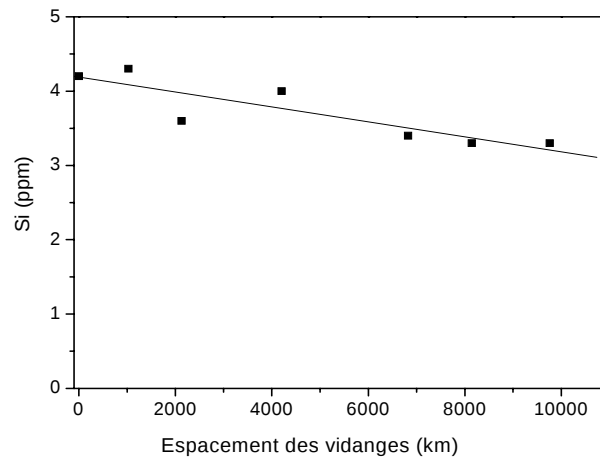


Figure 4.42: Evolution des traces de Si en fonction des espacements des vidanges

Le silicium indique l'introduction de poussières atmosphériques, en générales riche en silice.

Le silicium est donc un indicateur de la propreté du lubrifiant et de sa pollution par la poussière.

La figure 4.42 indique que l'évolution du silicium reste relativement constante. Ce constat nous révèle que notre huile conserve encore ses qualités.

Dans le cas où des niveaux élevés de silicium apparaissent, ils seraient liés à la présence importante de poussière, de sable et à une teneur élevée en agent anti-mousse au silicium.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les résultats auxquels nous avons abouti dans l'analyse des deux lubrifiants NAFTILIA SUPER SAE 20W50 et CHELIA VP SUPER SAE 20W40 nous ont permis de tirer quelques conclusions.

En effet, nos analyses nous ont permis de constater que plusieurs facteurs ont contribué à la dégradation des caractéristiques initiales des huiles étudiées. Parmi les facteurs observés, nous avons constaté:

- que la viscosité qui est la grandeur physique la plus importante dans un fluide a diminué en fonction du nombre de kilomètres parcourus ;
- que la viscosité a également diminué en fonction de l'augmentation de la température ;
- que l'acidité a fortement augmenté en fonction du nombre de kilomètres parcourus ;
- la présence de matières charbonneuses (les cendres) dans l'huile ;
- la présence des traces d'éléments dans le lubrifiant provenant soit de l'usure du moteur, soit des polluants, soit des additifs.

Concernant l'huile NAFTILIA SUPER SAE 20W50, la présence de ces traces est relativement faible selon nos résultats. Leur concentration reste dans les limites des normes arrêtées.

Quant à l'huile CHELIA VP SUPER SAE 20W40, la teneur des traces d'éléments dépassent les concentrations des limites arrêtées.

Néanmoins, une étude sur d'autres moteurs d'âge différents, utilisant la même huile et une augmentation du nombre de prélèvements peuvent nous permettre de tirer des conclusions plus probantes et de comprendre la situation en vue d'améliorer la durée de vie des lubrifiants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **J.Ayel, M.Born**, « Lurfiants et fluides pour l'automobile », Ed.Technip, Paris 1998.
- [2] **M.Zinbo, T.J. Korniski, J.E.Weir**, « Relationship between the composition of engine particulate emissions and emission control system performances », Industrial Engineering Chemical Research, 619-625, 1995.
- [3] **J.L.E. Groff**, « ABC du graissage », Ed.Technip, Paris 1968.
- [4] **J.Richard**, « les lubrifiants », Technique de l'ingénieur, Traité Mécanique et chaleur, B 5 344, 1993.
- [5] **J.Richard, F.Roux**, « les lubrifiants », Technique de l'ingénieur, B 590, 1986.
- [6] **L.Giraud**, Thèse de Doctorat, Université Laval, Quebec, mars 2000.
- [7] **R.Lefèvre**, « Graissage et tribotechnique – Compléments techniques », Complément n°2, Ed.Technip, Paris, 1977.
- [8] **L.Flammand**, « Fatigue des surfaces », Techniques de l'ingénieur, traité Mécanique et Chaleur, B 5 055, 1993.
- [9] **J.Richard, F.Roux**, « lubrifiants », Technique de l'ingénieur, traité Mécanique et Chaleur B590, B591, 1990.
- [10] **J.Briant, J.Denis, G.Parc**, « Propriétés rhéologiques des lubrifiants », Institut Français du Pétrole, Ed.Technip, Paris 1985.
- [11] **E.E.Klaus, E.J.Tewksbury**, « Liquid Lubricants », CRC Handbook of lubrication, Theory of tribology, volume II, Ed.E.Richard Booser, USA, pp.229-254, 1984.
- [12] **Elf Lubrifiants**, « Les fluides hydrauliques pour transmissions hydrostatiques de puissance », 32 p., 1991.
- [13] **E.C.Fittch**, « Proactive Maintenance for Mechanical systems », Ed.Elsevier advanced technology, England, 1992.
- [14] **E.Abner**, « Lubricant Deterioration in service », CRC Handbook of Lubrication, Volume I, Ed.E.Richard Booser, USA, pp.517-532, 1983.
- [15] **A.G.Hopkins, J.N.Anderson**, « Effects of Commercial Oil Additives on Wet Friction Systems », SAE Papers, 831312, 1983.

- [16] **W.H.Cave, M.I.Michael**, « A New Look at Multipurpose Power Transmission Fluids », SAE Papers, 870357, 1987.
- [17] **J.P.Lecref**, « Stabilité au cisaillement des fluides hydrauliques », Les lubrifiants industriels, Ed.Technip, colloques et séminaires, Paris, 1974.
- [18] **D.Godfrey, W.R.Herguth**, « Physical and Chemical Properties of Industrial Mineral Oils Affecting Lubrication », Lubrication Engineering, vol.51, n°10, pp.825- 828,1995.
- [19] **A.Sato, T.Oshika**, « Electrical Conductivity Method for Evaluation of Oxidative Degradation of Oil Lubricants », Lubrication Engineering, vol.48,n°7, pp.539-544, 1992.
- [20] **W.C.Gergel, S.Q.A.Rivzi and al**, «Lubrication Theory and Practice », The Lubrizol Corporation, Wickliffe, Ohio, 1994.
- [21] « Additives pour lubrifiants », OCD Ozimec Data corporation, vol.1, 1988-1998.
- [22] **J.P.Wauquier**, « Pétrole brut Produits pétroliers Schémas de Fabrication », tome 1, Edition Technip, 1994.
- [23] **O'Brien**, « Lubricating Oil additives », CRC Handbook of Lubrication-Theory and practice of tribology, Vol.II, USA, pp.301-315, 1984.
- [24] **M.Pourad**, « les lubrifiants », notes de cours de l'école polytechnique de Montréal, 1972.
- [25] **J.Ayel, M.Ganier**, « le lubrifiant véritable matériau de construction », CETIM, 1992.
- [26] **W.R.Jones**, « Thermal and Oxidative Stabilities of Liquid Lubricants », New Direction in Lubrication, The future for liquid lubricants and additives, Report n°NASA-TM-83465,1983.
- [27] **W.Nelson**, « Accelerated Testing – Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis », Ed.Jhon Wiley & Sons, New York, 1990 ».
- [28] **S.E.Schwartz, D.J.Smolenski**, « Development of an automatic Engine oil-Change Indicator System », SAE Papers, 870403, 1987.
- [29] **P.A.Hochstein**, « Method and Apparatus for Monitoring Oil Degradation », U.S Patent, 4 007 629, 1977.
- [30] **M.Imajo, T.Kawakita**, « Oil Degradation Warning System », U.S. Patent, 4 839 831, 1989.
- [31] **T.M.Hunt**, « Handbook of Wear Debris Analysis and Particule Detection in Liquids », Ed. Elsevier Applied Science, London 488 p., 1993.

- [32] **D.J.Smolenski and S.E.Schwartz**, « Automotive Engine-Oil Condition Monitoring », CRC Handbook of Lubrication and Tribology, Volume III-Monitoring, Materials, Synthetic Lubricants, and Applications, Ed.E.Richard Booser, CRC Press, USA, pp.17-32, 1994.
- [33] **T.Sawatari, M.Nakamura and al**, « Automotive Engine Oil Monitoring System », U.S.Patent, 4 677 847, 1987.
- [34] **CETIM**, « Fichier capteurs – Surveillance et maintenance des lubrifiants industriels en service », CETIM, service lubrifiants industriels, Saint-Etienne, 1994.
- [35] **Y.Maeda, H.Ueshima and al**, « An apparatus for Detecting Deterioration of lubricating Oil », Brevet européen, 0 442 314, 1991.
- [36] **H.S.Lee, S.S.Wang and O.J.Klingenmaier**, « Oil microsensor Having Interdigitated Electrodes with Rough Surfaces and Methods of Making and Using the same », Brevet européen, 0 542 337; 1992.
- [37] **K.Hosonuma, Y.Naito and al**, « Apparatus for Detecting Deterioration of lubricating Oil », Brevet européen, 0 429 884, 1989.
- [38] **T.Kato and M.Kawamura**, « Oil Maintenance Tester : A New Device to Detect the Degradation Level of Oils », Lubrication Engineering, vol 42, n°11, pp 694-699, 1986.
- [39] **C.A.Megerle**, « Oil Quality Monitor Sensor and System », U.S Patent, 5 089 780, 1991.
- [40] **A.D.Dickert, E.L.Jhonson and al**, « Oil Monitor with Magnetic Field », Brevet européen, 0 547 015, 1992.
- [41] **S.Yasuhara, H.Kobayashi and al**, « Oil Deterioration Sensor », Brevet européen, 0 080 632, 1982.
- [42] **A.H.Meitzler and G.S.Saloka**, « Method and Apparatus for Sensing the Condition of lubricating Oil in an internal Combustion Engine », U.S.Patent, 4 733 556, 1988.
- [43] **J.J.Henry, R.W.Johnson and al**, « Apparatus for Measuring the Dielectric Constant of Oil Utilizing an Active Filter Coupled to a Tuned Oscillator », U.S.Patent, 4 007 629, 1977.
- [44] **E.Goldenberg**, « Système de surveillance du degré de vieillissement d'un liquide de fonctionnement d'un moteur à combustion interne », Brevet français, 92 03859, 1992.
- [45] **<http://www.infineum.com>**.

- [46] **D.J.Smolenski and S.E.Schwartz**, « Automotive Engine-Oil Condition Monitoring», CRC Handbook of Lubrication and Tribology, Volume III-Monitoring, Materials, Synthetic Lubricants, and Applications, Ed.E.Richard Booser, CRC Press, USA, pp.17-32, 1994.
- [47] **A.VERLINDEN**, « Le contrôle des lubrifiants en service », les états généraux de la lubrification, Symposium d'information scientifique, technique et technologie, Tome I, Louvain –La-Neuve, Bruxelles, Novembre 1993.
- [48] **K.Saurabh**, « Additives depletion and engine oil condition -a case study », Industrial Lubrication and Tribology, vol. 57/2, 69-72, 2005.
- [49] **M.Kaufman**, Enviro-Guard Copmpagny, <http://garding-our-earth.com>, 2000.
- [50] **J.D.Turner, L. Austin**, « Electrical techniques for monitoring the condition of lubrication oil », pp.1794-1800, 2003.
- [51] **F.MOHELBI, E.SELMI, E.AOUDJIT, C.E.CHITOUR**, « Etude de la cinétique de la détérioration de l'huile lubrifiante moteur SAE 20W50 », 2^{ème} Congrès de la Société Algérienne de Chimie (S.A.C), Zéralda, 16-18 1993.

ANNEXES

Annexe A

DEFINITIONS

LA SUIE

La suie est un sous-produit de la combustion du carburant dans les moteurs diesels. Il s'agit de particules carbonées noires qui ne se dissolvent pas dans l'huile lubrifiante mais qui peuvent être maintenues en suspension et éliminées au moment des vidanges. Si la suie n'est pas bien dispersée dans une huile, elle peut en causer l'épaississement au-delà de son grade de viscosité d'origine. De plus, la suie peut s'agglomérer en particules assez volumineuses pour causer une usure abrasive, et lorsque l'accumulation de suie dans une huile devient trop importante, elle se dépose sous forme de boue.

LE VERNIS

Dépôt d'un film fin, insoluble et non retirable se formant sur des pièces internes et résultant de la dégradation et de la polymérisation de l'huile.

LA BOUE

Produit insoluble pouvant précipiter sous la forme d'un film mince et créer des dépôts de laques ou de vernis sur des surfaces métalliques chaudes ou froides.

Annexe B

Les huiles vidangées du moteur essence proviennent d'un véhicule de type RENAULT Mégane. L'année de mise en service de celui-ci est 2003.

Le moteur, disposé à l'avant, comprend 4 cylindres en ligne. Les caractéristiques techniques données par le constructeur sont :

- Alésage Course (mm) : 82,7 x 93;
- Cylindrée (cm³) : 1998;
- Puissance fiscale : 7CV;

Les huiles vidangées du moteur Diesel proviennent, quant à elles, d'un véhicule de type RENAULT Kangoo. L'année de mise en service de celui-ci est 2006.

Le moteur, disposé à l'avant, comprend 4 cylindres, à arbres, à cames, les caractéristiques techniques données par le constructeur sont :

- Alésage Course (mm) 80.0 x 93.0;
- Cylindrée (cm³) : 1870 ;
- Puissance fiscale : 65 CV ;
- Moteur 1.9D