

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955-Skikda
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique
Ref : D012120018D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية
المرجع :D012120018D

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en Mécatronique

**Influence des conditions de travail sur la qualité
des huiles hydrauliques**

Présentée par :
BENZAID LAMIA

Soutenue publiquement le 12 Octobre 2020

Devant le jury composé de :

Président	Fouad INEL	Maitre de conférences A	Université de Skikda
Encadreur	Nedjem-Eddine BENCHOUIA	Maitre de conférences A	Université de Souk Ahras
Co- encadreur	Azzedine BOUZAOUIT	Professeur	Université de Skikda
Examineurs	Elias HADJADJ AOUL	Professeur	Université d'Annaba
	Mohamed Rafik SARI	Professeur	Université d'Annaba
	Ammar DIB	Maitre de conférences A	Université d'Annaba

Remerciement

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner tout ma gratitude.

En commençant par remercier tout d'abord Monsieur BENCHOUIA Nedjem-eddine et Monsieur BOUZAOUIT Azzedine, mes directeurs de thèse, pour leurs aides précieuses et le temps qu'ils m'ont consacré. Leur encouragement et leur assistance m'ont permis d'accomplir cette thèse dans les meilleures conditions.

Je remercie chaleureusement Monsieur INEL Fouad de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je voudrais aussi témoigner toute ma gratitude à Monsieur HADJADJ AOUEL Elias, ainsi que Monsieur SARI Mohamed Rafik et Monsieur DIB Ammar, d'avoir accepté d'être membre de jury.

Je tiens à remercier du fond du cœur mon père, ma mère, mon mari qui me supportent et soutiennent depuis toujours ; merci à mes chers enfants Abd Rahim, Abd Raouf et Rahma.

Je n'oublie pas à remercier toutes les personnes de près ou de loin, qui ont contribué au bon déroulement de cette thèse. Je ne pourrai terminer cet espace sans remercier mes collègues avec lesquels j'ai passé des moments agréables à l'Université 20 Août 1955 Skikda.

Résumé

Intitulé : Influence des conditions de travail sur la qualité des huiles hydrauliques

Dans ce travail, nous avons présenté une étude analytique et expérimentale pour décrire le suivi et le changement de l'état de la viscosité d'une huile lubrifiante, utilisée dans des moteurs à combustion, et qui sont exploités dans des conditions très sévères. L'objectif est dédié pour déterminer la durée de vie restante de cette huile.

Les méthodes stochastiques en générale sont des méthodes statistiques pouvant être utilisées dans l'analyse prédictive, qui dépend fortement de la théorie de la probabilité. Les modèles de Markov en particulier, permettent de prédire la dégradation de la viscosité d'une huile après une durée de fonctionnement déterminée. Par les quelles cette dégradation peut être décrite par des probabilités de transition d'un état à un autre. Sachant que les modèles Markoviens à leurs tours sont utilisés pour décrire la probabilité de transition à un nouvel état (i) à l'instant (t+1) en se basant directement sur la probabilité de l'état précédent (j) à l'instant (t).

Dans ce contexte, nous avons proposé un modèle de Markov pour étudier la loi de la dégradation de l'huile SAE 40, assurant la lubrification des moteurs des locotracteurs dans les conditions du complexe sidérurgiques en Algérie.

Nous avons confirmé que le modèle proposé, donne des résultats détaillés décrivant les différents états de l'huile analysée.

Mots clés: huiles hydrauliques, propriété des huiles, viscosité, lubrification, chaînes de Markov.

Abstract

Entitled : Influence of working conditions on the quality of hydraulic oils

In this work, we present an analytical and experimental studies to describe the monitoring and change in the condition of viscosity of lubricating oil used in combustion engines, and exploited under very severe conditions.

The objective is to determine the remaining lifetime of this oil. Stochastic methods in general are statistical methods that can be employed in predictive analysis, and which highly depend on probability theory. Markov models in particular, make it possible to predict the degradation of the oil viscosity after a determined operating time. In these, degradation can be described by transition probabilities from one state to another. Knowing that Markov models are used to describe the transition probability to a new state (i) at time (t) based directly on probability of the previous state (j) at time (t-1).

In this context, we propose a Markov model to study the degradation law for the SAE 40 oil. The latter is designed for the lubrication of locomotives engines under the working conditions of a steel plant in Algeria.

We have demonstrated that the proposed model gives detailed results describing the different condition/states of the analyzed oil.

Key words: hydraulic oils, property of oils, viscosity, lubrication, Markov chains.

الملخص

عنوان المذكرة : تأثير ظروف العمل على جودة الزيوت الهيدروليكية

من خلال هذا العمل، نقدم دراسة تحليلية و تجريبية لوصف التغيير في حالة لزوجة زيت التشحيم المستخدم في محركات الاحتراق والتي تعمل في ظروف قاسية للغاية بهدف تحديد العمر المتبقي لهذا الزيت.

الأساليب العشوائية بشكل عام هي طرق إحصائية يمكن استخدامها في التحليل التنبؤي ، والتي تعتمد بدرجة كبيرة على نظرية الاحتمالات. تتنبأ نماذج ماركوف على وجه الخصوص بتدهور لزوجة زيت التشحيم بعد وقت تشغيل محدد. يمكن من خلالها وصف هذا التدهور باحتمالات الانتقال من حالة إلى أخرى بحيث تستخدم نماذج ماركوف لوصف احتمال الانتقال إلى حالة جديدة (ع) في اللحظة (ز+1) استنادا إلى الحالة السابقة (س) في اللحظة (ز)

في هذا السياق ، اقترحنا نموذجا لماركوف لدراسة قانون تدهور زيت تشحيم محركات القطارات التي تعمل في ظروف قاسية بمركب الحديد والصلب المتواجد بالجزائر.

في الأخير أكدنا أن النموذج المقترح يعطي نتائج مفصلة تصف الحالات المختلفة لزيت التشحيم التي تم تحليلها

الكلمات المفتاحية : الزيوت الهيدروليكية ، خاصية الزيوت ، اللزوجة ، التشحيم ، سلاسل ماركوف.

Publication et communication relatives à ce travail

- L. Benzaid, N. Benchouia, A. Bouzaouit, Modeling the degradation of viscosity of engine oils with a stochastic method, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 11, N°.1, pp. 9-15, 2020, Tokai university, Kumamoto.

- L. Benzaid, A. Bouzaouit, L. Khochemane, Etude de l'efficacité de lubrification d'un moteur diesel par analyse des huiles, Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité industrielle CIMSI'2013 , 28-29 Octobre 2013, Université 20 Aout 1955, Skikda.

- L. Benzaid, A. Bouzaouit, Etude sur la variation de la viscosité des huiles hydraulique, 3^{ème} Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité industrielle CIMSI'2015, 9-10 Novembre 2015, Université de 20 Aout 1955, Skikda.

- L. Benzaid, N. Benchouia, A. Bouzaouit, Prédiction du changement d'état de la viscosité du lubrifiant par les chaînes de Markov, 5th International Conference on Maintenance and Industrial Safety CIMSI'2019, 2-3 December 2019, Université 20 aout 1955, Skikda.

Table de matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
ملخص.....	iv
Publications et communications relative à ce travail.....	v

Table de matières

Nomenclature.....	vi
Acronymes.....	vii
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	ix

Introduction générale 1

Chapitre.I : Caractérisations et topologies des huiles lubrifiantes

I.1.Introduction.....	3
I.2. Huiles de lubrification.....	3
I.2.1. Fabrication de lubrifiant industriel.....	3
I.2.2. Fonctions d'une huile hydraulique.....	4
I.2.3. Composition de l'huile de lubrifications.....	5
I.2.3.1. Huiles minérales.....	6
I.2.3.2. Huiles hydrauliques végétales.....	6
I.2.3.3. Huiles synthétiques.....	6
I.2.4. Additifs	6
I.2.4.1. Antioxydants.....	7
I.2.4.2. Détergents.....	7
I.2.4.3. Additifs dispersants.....	7
I.2.4.4. Extrêmes pressions.....	7
I.2.4.5. Anti-usures et antifrictions.....	8
I.2.4.6. Antirouilles et anti corrosions.....	8
I.2.4.7. Améliorants de l'indice de viscosité.....	8
I.2.4.8. Abaisseurs du point d'écoulement.....	8
I.2.4.9. Additifs antimousse.....	9
I.2.5. Caractérisation physico-chimique des huiles lubrifiantes pour moteur Diesel..	9
I.2.5.1. Viscosité.....	9

I.2.5.1. Définition.....	9
I.2.5.2. Variation de la viscosité en fonction de température.....	11
I.2.5.3. Variation de viscosité avec la pression.....	13
I.2.5.2. Densité.....	13
I.2.5.3. Indice de viscosité.....	13
I.2.5.4. Masse volumique.....	14
I.2.5.5. Couleur.....	14
I.2.5.6. Chaleur massique.....	15
I.2.5.7. Masse molaire.....	15
I.2.5.8. Indice de réfraction.....	15
I.2.5.9. Point éclair.....	15
I.2.5.10. Point d'écoulement.....	15
I.2.5.11. Indice d'acidité ou dosage de l'acidité totale (TAN).....	16
I.2.5.12. Indice de basicité ou dosage de basicité totale (TBN).....	16
I.2.5.13. Teneur en eau.....	16
I.2.5.14. Onctuosité.....	16
I.2.6. Classification des huiles.....	16
I.2.6.1. Classification ISO.....	17
I.2.6.2. Classification SAE.....	18
I.2.6.3. Classification européennes.....	19
I.2.7. Différents types de dégradation de l'huile lubrifiante.....	19
I.2.7.1. Phénomènes d'oxydation.....	19
I.2.7.2. Phénomènes de nitration.....	19
I.2.7.3. Contaminations solides et liquides.....	20
I.2.7.4. Cisaillement mécanique.....	20
I.2.8. Différents régimes de lubrification.....	20
I.2.8.1. La courbe de Stribeck.....	20
I.2.8.2. La lubrification limite.....	21
I.2.8.3. La lubrification mixte.....	22
I.2.8.4. Régimes de lubrification fluide.....	23
I.2.8.5. Régime du contact sec.....	23
I.3. La lubrification d'un moteur à combustion interne.....	24
I.3.1. Fonctionnement d'un moteur diesel à quatre temps.....	24

I.3.2. Avenages et les inconvénients de moteurs diesel.....	27
I.3.2.1. Avenages.....	27
I.3.2.2. Inconvénients.....	27
I.3.3. Modes de la lubrification dans les moteurs.....	27
I.3.3.1. Graissage par barbotage.....	28
I.3.3.2. Graissage sous pression.....	28
I.3.3.3. Graissage par projection.....	29
I.3.4. Circuit de lubrification.....	29
I.3.5. Principaux éléments de circuit de la lubrification du moteur.....	30
I.3.5.1. Pompe à huile.....	30
I.3.5.2. Clapet de décharge.....	31
I.3.5.3. Filtre à huile.....	31
I.3.5.4. Radiateur d'huile.....	32
I.3.6. Défauts de la lubrification des moteurs.....	32
I.3.6.1. Consommation anormale d'huile.....	32
I.3.6.2. Pollution ou la contamination.....	33
I.3.6.3. Dilution.....	34
I.3.6.4. Augmentation de la température de l'huile.....	35
I.3.6.5. Pression d'huile insuffisante.....	35
I.4. Conclusion.....	36

Chapitre II : Processus stochastique et chaînes de Markov

II.1. Introduction.....	37
II.2. Variable aléatoire.....	37
II.3. Processus stochastique.....	37
II.3.1. Définitions.....	38
II.3.2. Propriétés des processus.....	38
II.4. Processus de Markov.....	39
II.5. Processus de Lévy.....	40
II.6. Processus de Poisson.....	40
II.7. Processus Gamma.....	42
II.8. Processus de Wiener.....	43
II.9. Réseaux bayésiens (RB).....	44
II.10. Chaînes de Markov.....	45

II.10.1. Définition.....	45
II.10.2. Diverses applications des chaînes de Markov.....	45
II.10.3. Propriété forte de Markov.....	46
II.10.4. Probabilité de transition.....	46
II.10.5. L'équation de Chapman-Kolmogorov.....	47
II.10.6. Matrice de transition.....	47
II.10.6.1. Définition.....	48
II.10.6.2. Propriétés de la matrice de transition.....	48
II.10.6.3. Graphe associé à une matrice de transition.....	48
II.10.7. Régime transitoire.....	49
II.10.8. Régime permanent.....	50
II.10.9. Classification des états.....	50
II.10.9.1. Accessibilité d'un état.....	50
II.10.9.2. Communication entre états.....	50
II.10.9.3. Etat stable.....	51
II.10.9.4. Etat absorbant.....	51
II.10.9.5. Etat transient.....	51
II.10.9.6. Etat récurrent.....	51
II.10.9.7. Une classe.....	51
II.10.10. Périodicité.....	51
II.10.11. Chaînes de Markov irréductibles.....	52
II.10.12. Chaîne de Markov homogène.....	52
II.10.13. Chaîne de Markov régulière.....	53
II.11. Conclusion.....	53

Chapitre III : Etude expérimentale sur la dégradation de la viscosité d'huile

SAE 40

III.1. Introduction.....	54
III.2. Matériels et méthodes.....	54
III.2.1. L'huile SAE 40.....	54
III.2.2. Moteurs à combustion de type POYAUD-DIESEL.....	55
III.2.2.1. Sens de rotation.....	57
III.2.2.2. Numérotage des cylindres.....	57
III.2.2.3. Ordre d'allumage.....	57

III.2.2.4. Lubrification de moteurs.....	57
III.2.3. Mesure de la viscosité.....	60
III.2.3.1. Appareillages.....	60
III.2.3.2. Mode opératoire.....	62
III.3. Résultats et discussion.....	63
III.4. Conclusion.....	68
Chapitre IV : Modélisation de la dégradation de la viscosité des huiles moteurs	
IV.1. Introduction.....	69
IV.2. Méthodologie du travail.....	69
IV.3. Résultats et discussion.....	72
IV.4. Conclusion.....	81
Conclusion Générale	
Références bibliographiques.....	84
Annexe A.....	92
Annexe B.....	93

Nomenclature

X	Variable aléatoire
$X(t)$	Variable au cours du temps
(Ω, A, P)	Espace de probabilité
Ω	L'ensemble des résultats possibles
A	L'ensemble des événements possibles
P	La loi de probabilité définie sur A .
χ	Espace d'état
$E(x_t)$	L'espérance
$R(s, t)$	La fonction de corrélation
$N(t)$	La fonction de comptage
$f(x)$	La fonction de densité de probabilité
α	Paramètre de forme (Processus de gamma)
β	Paramètre d'échelle (Processus de gamma)
λ	Intensité (Processus de poisson)
P_{ij}	La probabilité d'aller de l'état i à l'état j
P_{ij}^n	La probabilité d'aller de l'état i à l'état j en n pas
M	Matrice de transition
M^n	Matrice de transition à la puissance n
d	Période de l'état d'une chaîne de Markov
η	Viscosité
η_{moy}	Viscosité moyenne
η_{min}	Viscosité minimale
p_n	Le vecteur des Probabilité à l'étape n .
p_{n-1}	Le vecteur des Probabilité à l'étape $n - 1$
p_0	Le Vecteur des Probabilités initiales

Acronymes

ASTM	American Society of Testing Materials (USA)
SAE	Society of Automotive Engineers (USA)
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobile)
CCMC	Comité des Constructeurs d'automobile du Marché Commun
NPA	National Petroleum Association
W	Winter
VI	Viscosity Index
VII	Viscosity Index Improver
ISO	International Standard Organisation
EP	Extrême-Pression
TAN	Total Acid Number
TBN	Total Base Number
API	American Petroleum Institute (USA)
PP	Processus de Poisson
RB	Réseau Bayésien
MB	Mouvement Brownien
CM	Chaine de Markov
GM	Graphes de Markov
PGCD	Plus Grand Commun Diviseur

Liste des Figures

Chapitre. I

Figure.I.1. La chaine traditionnelle de raffinage des huiles minérales.....	4
Figure.I.2. Cisaillement d'un fluide entre deux plaques parallèles.....	10
Figure.I.3. Définition de l'indice de viscosité.....	14
Figure.I.4. Plages de viscosité en fonction de la température pour la classification SAE. SAE.....	18
Figure.I.5. Différents régimes de lubrification sur une courbe de Stribeck.....	21
Figure.I.6. Représentation de la lubrification limite.....	22
Figure.I.7. Représentation de la lubrification mixte.....	22
Figure.I.8. Cycle moteur à quatre temps.....	25
Figure.I.9. Le cycle Diesel mixte quatre temps.....	26
Figure.I.10. Le cycle Réel diesel quatre temps.....	26
Figure.I.11. Graissage barbotage.....	28
Figure.I.12. Graissage sous pression.....	28
Figure.I.13. Graissage par projection.....	39
Figure.I.14. System de lubrification.....	30
Figure.I.15. Pompes à engrenages, à rotor, à palettes respectivement.....	30
Figure.I.16. Le clapet de décharge.....	31
Figure.I.17. Le filtre à huile.....	32

Chapitre.II

Figure.II.1. Graphe de Markov a trois états.....	49
--	----

Chapitre.III

Figure.III.1. Moteur Poyaud Diesel A 12150 SCr1-V12.....	56
Figure.III.2. Numérotation des cylindres.....	57
Figure.III.3. Circuit de lubrification de moteur POYAUD DIESEL.....	59
Figure.III.4. Viscosimètre à capillaire Cannon-Fenske.....	61
Figure.III.5. Bain viscosimétrique.....	61
Figure.III.6. Chronomètre Numérique.....	62
Figure.III.7. Variation de la viscosité d'huile en fonction du temps de service.....	65
Figure.III.8. Courbe moyenne de la variation de la viscosité pour les huiles moteurs de la 2 ^{ème} catégorie.....	67

Chapitre.IV

Figure.IV.1. Le modèle graphique.....	71
Figure.IV.2. Représentation graphique de changement d'état de la viscosité des huiles étudiées pendant 125h de service	74
Figure.IV.3. Probabilité du différent état de viscosité d'après le modèle proposé.....	78
Figure.IV.4. Les probabilités selon le modèle et les probabilités calculées avec la méthode classique "viscosité bonne"	80
Figure.IV.5. Les probabilités selon le modèle et les probabilités calculées avec la méthode classique "viscosité très dégradée".....	80

Liste des tableaux

Chapitre.I

Tableau I.1. Principaux lubrifiants.....	5
Tableau.I.2. Classification ISO de la viscosité des huiles.....	17

Chapitre.III

Tableau.III.1. Caractéristique de l'huile SAE 40.....	55
Tableau.III.2. Caractéristiques de moteurs POYAUD-DIESEL.....	56
Tableau.III.3. Résultats d'analyse des échantillons.....	63

Chapitre.IV

Tableau.IV.1. Changement d'état de la viscosité des huiles étudiées.....	73
Tableau.IV.2. La probabilité calculée de l'état bon et très dégradée.....	79

Introduction générale

Introduction générale

La lubrification est très importante dans le monde industriel où elle est largement utilisée dans les transports et toutes les machines. La principale fonction de la lubrification dans le moteur consiste à augmenter la durée de vie des organes en minimisant les interactions destructives entre surfaces antagonistes, en séparant ces dernières de façon la plus complète possible. La lubrification permet de réduire les pertes d'énergie due au frottement, diminuer l'usure des surfaces frottantes et le bruit dû au contact.

Assurer une bonne lubrification du moteur diesel repose sur la réalisation d'un mécanisme hydraulique de lubrification bien adéquat et sur la formulation d'une huile disposant de plusieurs propriétés physico-chimiques.

La qualité de l'huile de lubrification utilisée dans le moteur joue un rôle important dans la prolongation de la durée de vie du moteur et dans l'amélioration des performances de ce dernier.

La viscosité est l'un des facteurs physico-chimiques majeurs de la qualité et de l'efficacité de lubrifiant, sa capacité à fournir l'épaisseur effective de la couche lubrifiante entre les surfaces de friction, ce qui évite l'usure sévère et la défaillance des moteurs.

Les chaînes de Markov sont les modèles mathématiques les plus simples pour les phénomènes aléatoires qui évoluent dans le temps. Leur structure est suffisamment simple pour que l'on puisse en dire beaucoup sur leur comportement. Pourtant, la classe des chaînes de Markov est suffisamment riche pour servir dans de nombreuses applications.

Pendant la durée de vie de l'huile moteur sa viscosité passe par plusieurs états : bonne, admissible, dégradée, très dégradée, Au de-là nous proposons d'associer une chaîne de Markov décrivant la transition de la viscosité d'un état (i) à un autre état (j) pour les huiles moteurs.

Ce travail a pour objectif de modéliser le changement d'état de la viscosité de l'huile lubrifiante en utilisant un modèle de Markov, ce qui nous permet de suivre la dégradation de la qualité de l'huile et ce par le calcul de la probabilité pour que la viscosité sera dégradée tout le long de sa durée de vie d'un côté et de donner une estimation de la durée de vie restante de l'autre côté.

Afin d'atteindre cet objectif, notre étude s'articule autour de **quatre chapitres**.

Le premier chapitre est consacré à des rappels bibliographiques focalisés respectivement sur les huiles hydrauliques, la lubrification, et les moteurs diesels. Cela nous a permis de dévoiler les caractéristiques principales de la lubrification du moteur diesel.

Le deuxième chapitre est réservé à une étude de quelque processus stochastique qui permet de modéliser efficacement certains phénomènes aléatoires et spécialement les chaînes Markov.

Le troisième chapitre présente une étude expérimentale sur la dégradation des huiles moteurs afin de déterminer le temps de fonctionnement optimal de ces huiles. Nous avons présenté des équipements et des méthodes nécessaires pour réaliser les analyses qui consistent à évaluer le changement de la viscosité.

Le quatrième chapitre et le dernier chapitre, consistent à proposer la méthodologie à suivre pour modéliser la dégradation de la viscosité des huiles utilisées pour la lubrification des moteurs à combustion avec les chaînes de Markov.

En dernier lieu, on clôture notre thèse par une conclusion générale en faisant ressortir les principaux résultats de cette étude.

Chapitre I : Caractérisations et topologies des huiles lubrifiantes

I.1.Introduction.....	3
I.2. Huiles de lubrification.....	3
I.2.1. Fabrication de lubrifiant industriel.....	3
I.2.2. Fonctions d'une huile hydraulique.....	4
I.2.3. Composition de l'huile de lubrifications.....	5
I.2.4. Additifs	6
I.2.5. Caractérisation physico-chimique des huiles lubrifiantes pour moteur Diesel..	9
I.2.6. Classification des huiles.....	16
I.2.7. Différents types de dégradation de l'huile lubrifiante.....	19
I.2.8. Différents régimes de lubrification.....	20
I.3. La lubrification d'un moteur à combustion interne.....	24
I.3.1. Fonctionnement d'un moteur diesel à quatre temps.....	24
I.3.2. Avenages et les inconvénients de moteurs diesel.....	27
I.3.3. Modes de la lubrification dans les moteurs.....	27
I.3.4. Circuit de lubrification.....	29
I.3.5. Principaux éléments de circuit de la lubrification du moteur.....	30
I.3.6. Défauts de la lubrification des moteurs.....	32
I.4. Conclusion.....	36

I.1. Introduction

La lubrification est l'action d'assurer un film d'huile entre deux pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre afin de réduire le frottement et l'usure, prévenir la défaillance et assurer une durée de vie optimale à chaque organe mécanique.

Cette étude focalisée sur les lubrifiants et la lubrification de ces machines, dans un objectif qui vise à définir le contexte général de la problématique de la viscosité des lubrifiants, et de positionner le sujet de la thèse par rapport aux études existantes.

Le chapitre est présenté selon deux parties essentielles : La première apporte des informations descriptives des lubrifiants, en mettant en évidence leurs propriétés physico-chimiques des huiles lubrifiantes avec une étude profonde sur la viscosité qu'est le paramètre le plus important qui caractérise l'huile, ainsi que les différents types de dégradation de l'huile lubrifiante et les différents régimes de lubrification. Alors que la deuxième présente une description de la typologie de la lubrification dans d'un moteur à combustion interne plus spécialement le moteur diesel et les défauts de la lubrification de ce moteur.

I.2. Huiles de lubrification

I.2.1. Fabrication de lubrifiant industriel

La chaîne traditionnelle de raffinage des huiles minérales comporte les étapes suivantes (Figure.I.1) [2] :

La distillation atmosphérique du pétrole brut pour séparer les produits pétroliers selon leurs points de distillation.

La distillation sous vide du résidu de distillation atmosphérique permet d'obtenir différentes coupes appelées distillat sous vide de viscosités variables, et un produit très lourd, le résidu sous vide destiné à la fabrication des bitumes et des huiles lubrifiantes les plus visqueuses dans l'unité de désasphaltage au propane.

L'extraction au solvant des composés polycycliques contenus dans les distillats sous vide permet d'améliorer la stabilité à l'oxydation et la couleur. Le solvant solubilise sélectivement les composés aromatiques et polycycliques éliminés sous forme d'extraits aromatiques.

Le déparaffinage consiste en l'élimination plus ou moins poussée, selon le point d'écoulement visé, des cristaux de paraffines indésirables en dissolvant l'huile dans un mélange de solvants spécifiques. Le mélange huile-solvant est refroidi ; les paraffines qui cristallisent sont séparées par filtration sur tambours.

Le traitement de finition parachève éventuellement le raffinage en éliminant les derniers constituants indésirables (aromatiques résiduels, composés soufrés, azotés, oxygénés).

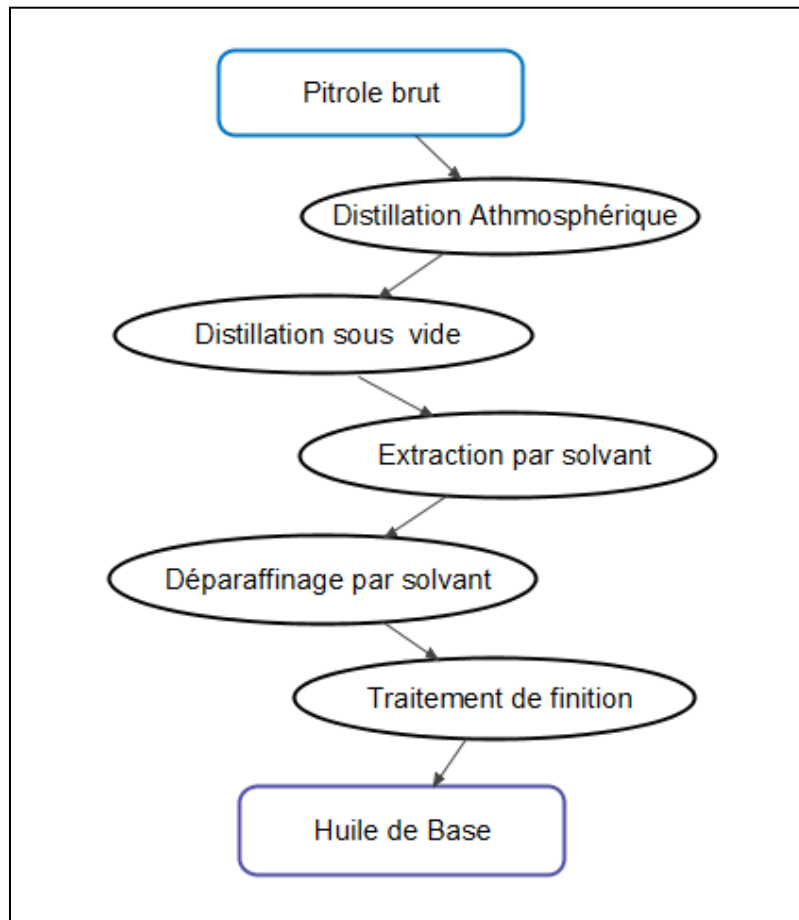


Figure. I.1. La chaîne traditionnelle de raffinage des huiles minérales [2].

I.2.2. Fonctions d'une huile hydraulique

Les fonctions des huiles des moteurs sont diverses et leurs rendement est remarquable, parmi ces fonctions : [3]

- Transmettre de l'énergie: transférer une énergie sous forme de pression ou de vitesse d'un point à un autre point rapidement et avec précision. IL peut s'agir d'un couple (rotation) ou d'un mouvement (translation linéaire).

- **Lubrifier:** Réduire la friction entre des pièces en mouvement en minimisant les frottements et l'usure quelque soit la charge, la température et la vitesse.
- **Refroidir:** Évacuer les calories créées par le travail mécanique, le laminage ou cédées par le milieu ambiant.
- **Protéger de la corrosion:** La corrosion est une réaction chimique entre l'eau et un métal. Les additifs des huiles vont créer un film de protection sur les surfaces métalliques du circuit.
- **Maintenir l'étanchéité:** Grâce à une viscosité adaptée, le lubrifiant limite les fuites dans les pompes, moteurs et vérins. Il s'agit d'empêcher l'écoulement d'un fluide d'une enceinte à une autre.
- **Évacuer les polluants:** L'usure, les opérations de maintenance et les étanchéités imparfaites génèrent de la pollution. L'huile véhicule ces pollutions particulaires et/ou aqueuses vers les filtres dans un but de rétention puis d'élimination.
- **Informer:** L'analyse des informations recueillies permet de connaître précisément l'état de l'huile et donc du système, puis de mettre en place des actions correctives ou de maintenances prédictives et/ou préventives.

I.2.3. Composition des huiles de lubrification

Les huiles de lubrification actuellement utilisées sont constituées d'une base lubrifiante qui leur confère leurs propriétés fondamentales : viscosité, indice de viscosité, point d'écoulement...et d'additifs (1-25%) ajoutés soit pour renforcer les propriétés de la base lubrifiante soit pour apporter à celle-ci des propriétés qu'elle ne possède pas naturellement.

Tableau I.1. Principaux lubrifiants [4].

	LIQUIDES	PATEUX	SOLIDES
Lubrifiants minéraux	Huiles minérales (paraffine, naphte) obtenues par distillation du pétrole	Graisses à base d'huile de pétrole Pâtes lubrifiantes Lanoline	Graphite Bisulfure de molybdène Biséléniures Cires, résines
Lubrifiants de synthèse	Huiles synthétiques (polyglycols, esters...) obtenues à partir de produits simples issus de la pétrochimie	Graisses de synthèse (silicone)	Plastiques fluorés (PTFE...) Polyamides Vernis de glissement

I.2.3.1. Huiles minérales

Extraites des opérations du raffinage de fractions pétrolières, sont très utilisées dans la formulation des huiles moteurs. Elles disposent de nombreuses propriétés dont de bonnes performances à froid grâce à la paraffine contenue dans cette huile, un bon pouvoir solvant, une viscosité cinématique à 100°C comprise entre 5 et 30 mm²/s [5,6].

I.2.3.2. Huiles hydrauliques végétales

Provenant des plantes oléagineuses ont pour propriétés leur biodégradabilité et leur bonne performance en friction [5,6].

I.2.3.3. Huiles synthétiques

Dérivée de traitements chimiques en laboratoire ou par hydrocraquage d'huile minérale, l'huile de synthèse a une volatilité très inférieure à l'huile minérale et affiche une teneur en huiles ultra raffinées plus performantes en termes de protection. Elle est notamment utilisée dans les moteurs de voiture. Elle possède en outre un gros indice de viscosité et assure une bonne stabilité aux températures qu'elles soient élevées ou basses.

I.2.4. Additifs

Les additifs sont très nombreux et de toute sortes [7,8] ; ils présentent environ 25% de la masse totale de l'huile utilisée, chacun ayant une fonction bien définie.

Les additifs constituent une famille de produits extrêmement diversifiée qui sont destinés soit à renforcer certaines propriétés intrinsèques de bases lubrifiantes comme le point d'écoulement, l'indice de viscosité, la résistance à l'oxydation, les propriétés anti-usure et antifriction ou le pouvoir de protection antirouille, ou bien leur apporter des propriétés qu'elles ne possèdent pas (ou peu) naturellement comme la détergence, le pouvoir dispersif, l'alcalinité en vue de neutraliser les composés acides, le pouvoir de protection contre la corrosion des métaux non ferreux, et les propriétés extrême-pression. Dans certains cas, ils peuvent aussi combattre des défauts apportés par d'autres additifs. Ainsi, les additifs antimousse évitent la formation de mousses liées à la présence dans le lubrifiant d'additifs tensioactifs comme les détergents, les dispersants, les agents émulsifiants des fluides aqueux ou même les additifs d'onctuosité et les antirouilles.

I.2.4.1. Antioxydants

L'oxydation des hydrocarbures et autres constituants des lubrifiants est le phénomène qui détermine leur durée de vie et, dès que la température d'utilisation dépasse 50 à 60°C en continu et à l'air, le recours à des additifs antioxydants devient indispensable. L'oxydation des hydrocarbures en phase liquide est un mécanisme radicalaire en chaîne conduisant à des radicaux libres [9-11].

Les antioxydants sont de nature à diminuer ou empêcher l'oxydation des huiles, afin de ralentir le vieillissement rapide de l'huile, ils agissent selon leurs structures chimiques, par l'arrivée de l'oxygène provenant de l'air de haute température et de métaux [12,13].

I.2.4.2. Détergents

Les détergents sont des additifs qui possèdent des propriétés nettoyant vis-à-vis d'une surface solide mouillée, et de maintenir le circuit de distribution. Elles se caractérisent par un PH basique ou neutre pour prévenir de la formation des dépôts à chaud sur les surfaces chaudes. Grâce à leur alcalinité, ils peuvent neutraliser également des produits acides, qui se forment du fait de la combustion de l'huile [14,15].

I.2.4.3. Additifs dispersants

Renfermant presque toujours un motif dispersant azoté, ces additifs ont pour fonction de maintenir en suspension stable toutes les impuretés formées ou introduites au cours du fonctionnement des moteurs [14,15].

I.2.4.4. Extrêmes pressions

Les additifs extrême-pression (EP) sont ceux dont l'usage est le plus ancien. Ils réduisent les couples de frottement des surfaces soumises à de fortes charges et par conséquence économisent l'énergie [16,17].

Les additifs EP sont plus réactifs chimiquement vis-à-vis des surfaces métalliques que l'additive anti-usure. Les molécules EP les plus actives sont essentiellement des composés organosoufrés et organochlorés. Sous l'effet des fortes températures locales dues à un frottement métal-métal sévère, ils sont décomposés et libèrent du soufre et du chlore à l'état natif. Ces éléments réagissent avec les métaux, le fer en particulier, pour donner des films de sulfures et de chlorures métalliques à faible résistance au cisaillement. [18].

I.2.4.5. Anti-usures et antifrictions

Pour les huiles de transmissions automobiles, les lubrifiants industriels et les graisses à capacité de charge améliorée, les additives anti-usures sont sélectionnées en fonction des contraintes d'utilisation. Leur objectif est de renforcer l'action anti-usure qu'exerce un lubrifiant vis-à-vis des organes qu'il lubrifie.

I.2.4.6. Antirouilles et anti corrosions

Dans la pratique de la lubrification, les additifs destinés à lutter contre la corrosion en général sont désignés « additifs antirouille » lorsqu'ils combattent la corrosion humide des métaux ferreux et « additifs anticorrosifs » ou inhibiteurs de corrosion lorsqu'ils sont destinés à combattre la corrosion acide ou la corrosion par le soufre des métaux non ferreux et notamment des alliages cuivreux.

Les antirouilles et anti corrosions sont des additifs qui protègent les parties métalliques, ils retardent l'apparition de la rouille qui provient de la corrosion humide. Ils évitent l'altération d'un matériau provenant des gaz de combustion contre la corrosion [12,13].

I.2.4.7. Améliorants de l'indice de viscosité

Toutes les huiles ont des variations de viscosité dès lors qu'elles subissent des écarts de température. Quand la température augmente, la viscosité chute et inversement. L'indice de viscosité traduit l'importance de la variation de viscosité en fonction de la température. Les produits améliorant l'indice de viscosité, appelés aussi en anglais Viscosity Index Improver (VII), sont des polymères qui, en solution dans la base lubrifiante, l'épaississent notablement à haute température pour éviter le contact des pièces en mouvement tout en n'ayant qu'une très faible influence sur la viscosité à basse température, ce qui facilite le démarrage à froid des mécanismes en réduisant en même temps les pertes énergétiques par frottement [19,20].

I.2.4.8. Abaisseurs du point d'écoulement

Les abaisseurs du point d'écoulement sont des additifs qui ont pour rôles le retardement de la formation des cristaux de paraffines, à basse température, pour lui permettre à un bon écoulement en les enveloppant avec ces additifs afin d'interdire leur fusionnement lors du refroidissement.

I.2.4.9. Additifs antimousse

Le moussage de l'huile peut être dû :

- À la présence d'autres additifs. Les additifs détergents agissent dans l'huile comme du savon dans l'eau: ils nettoient le moteur mais ont tendance à mousser.
- À la forme du circuit de graissage qui provoque des turbulences lors de l'écoulement du lubrifiant, facilitant ainsi le brassage air-huile et la formation des bulles.

Les additifs antimousses ont pour but de limiter la dispersion d'un grand volume d'air dans l'huile. On utilise souvent soit des huiles de silicones, soit des acrylates d'alkyles présents dans l'huile en très faibles quantités [21].

I.2.5. Caractérisation physico-chimique des huiles lubrifiantes pour moteur Diesel

Les principales propriétés permettant de caractériser une huile lubrifiante [22]:

I.2.5.1. Viscosité

La viscosité est la caractéristique la plus importante d'un fluide, elle est définie comme le rapport de la force de cisaillement et l'épaisseur des films d'huile. La viscosité se caractérise par la résistance du fluide à l'écoulement aux fortes températures.

I.2.5.1.1. Définition

La viscosité est l'un des facteurs physico-chimiques majeurs de la qualité et de l'efficacité de lubrifiant [23, 24], sa capacité à fournir l'épaisseur effective de la couche lubrifiante entre les surfaces de friction, ce qui évite l'usure sévère et la défaillance des moteurs [25-27].

Pour comprendre le concept de "viscosité" il faut imaginer deux plaques parallèles séparées par un film fluide, où une plaque se déplace à vitesse uniforme V (Figure.I.2). Si le lubrifiant adhère aussi bien à la surface stationnaire qu'à la surface mobile, on peut l'imaginer comme plusieurs couches, chacune mise en mouvement par celle au-dessus à une vitesse qui est une fraction de la vitesse V , proportionnelle à la distance à la paroi mobile (hypothèse du fluide newtonien pour un écoulement laminaire).

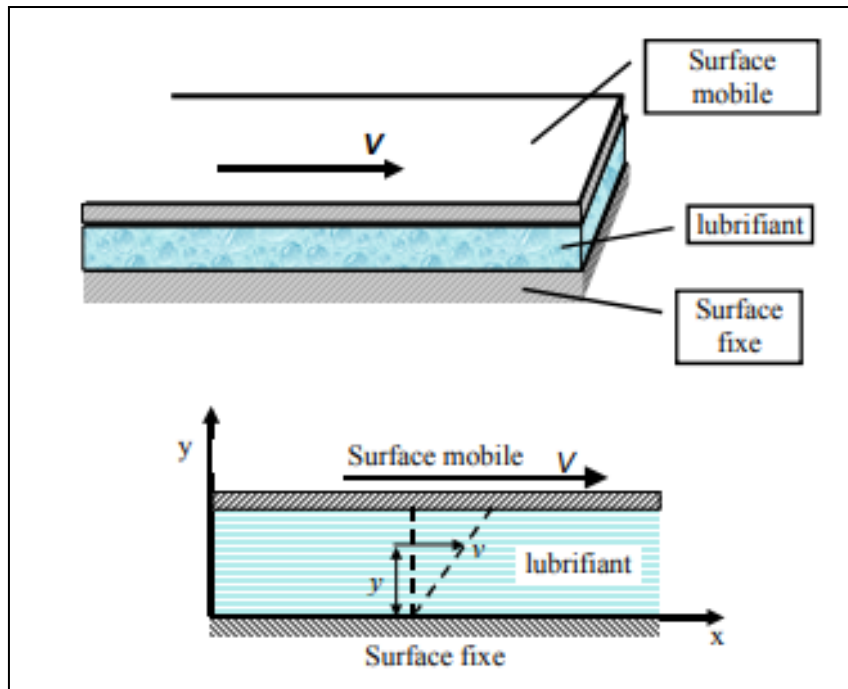


Figure. I.2. Cisaillement d'un fluide entre deux plaques parallèles [28].

Si à une distance y de la surface fixe la vitesse de la particule de fluide est v alors la contrainte tangentielle ou la contrainte de cisaillement τ_{xy} est donnée, en formulation unidimensionnelle, par :

$$\tau_{xy} = \mu \frac{dv}{dy} \quad (\text{I.1})$$

Où μ est le coefficient de viscosité dynamique. Cette expression est aussi écrite sous la forme :

$$\tau_{xy} = \mu \gamma \quad (\text{I.2})$$

Où γ est le taux de vitesse de déformation ou taux de cisaillement. L'équation dimensionnelle de la viscosité est :

$$[\mu] = ML^{-1}T^{-1} \quad (\text{I.3})$$

Dans le système normalisé (SI) l'unité est le Pascal seconde ($1 Pa \cdot s = 1 kg/m \cdot s$). En mécanique, on utilise aussi le concept de viscosité cinématique ν , qui est le rapport du coefficient de viscosité dynamique à la masse volumique du fluide ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (I.4)$$

L'unité de la viscosité cinématique dans le système d'unités CGS (cm, g, s) est le Stokes (St) mais souvent on utilise le centistokes (cSt). Dans le système SI l'unité s'exprime en m^2/s ($1 cSt = 1 mm^2/s$).

I.2.5.1.2. Variation de la viscosité en fonction de température

En général les fluides ont une viscosité qui dépend très largement de la température. Cette variation qui au voisinage de $20^\circ C$ est de 2.5% par degré pour l'eau peut atteindre 10 à 15% par degré pour les huiles minérales. La viscosité est une fonction décroissante de la température, elle chute très rapidement aux basses températures puis plus lentement aux températures élevées [29].

La relation entre la viscosité et la température est décrite par plusieurs lois empiriques. Pour l'huile de lubrification, on peut mettre [30]:

$$\mu = \mu_0 e^{\frac{E}{T}} \quad (I.5)$$

Avec

$$E = a + bT + cT^{\pm 2} \quad (I.6)$$

Où μ_0 est la viscosité dynamique à une température donnée, T est la température absolue et a, b, c doivent être déterminés pour chaque lubrifiant.

La relation de Reynolds modifié avec une viscosité corrective μ_c [31] :

$$\mu = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)} + \mu_c \quad (I.7)$$

Où μ est la viscosité dynamique à la température T , β le coefficient de thermo-viscosité et $(\mu_0 + \mu_c)$ est la viscosité à la température T_0 .

D'autres relations ont également été proposées, nous pouvons citer:

La relation de Barr :

$$\left[\log_{10}(\nu + a) \right]^{0.3} = A + \frac{B}{T} \quad (\text{I.8})$$

La relation de Hugel et Clairbois:

$$\log_{10}(\mu + a)(T + b) = c \quad (\text{I.9})$$

Où ν et μ sont respectivement les viscosités cinématique et dynamique de l'huile, T la température absolue et les constantes a, b, A, B et C caractéristiques du lubrifiant.

Le plus précis étant l'équation de Vogel:

$$\eta = ae^{\frac{b}{T-c}} \quad (\text{I.10})$$

Dans cette équation, a, b et c sont des constantes définies en connaissant trois valeurs de viscosité à trois températures connues et T est la température à laquelle la viscosité est mesurée.

On peut aussi utiliser la relation de Mc Coull et Walther [32] :

$$\log_{10}[\log_{10}(\nu + c_1)] = c_2 - c_3 \log_{10}(T_k) \quad (\text{I.11})$$

Où ν est la viscosité cinématique en centistokes et T_k la température absolue. c_1, c_2 , et c_3 représentent des constantes qui dépendent du lubrifiant.

La loi de Mc Coull et Walther est une expression souvent utilisée car elle a été adoptée et recommandée par la société américaine de tests de matériaux (ASTM). De plus, une représentation de $\log_{10}[\log(\nu + c)]$ en fonction de $\log_{10}(T_k)$ conduit à une relation linéaire de la viscosité en fonction de la température. Cette représentation est à la base de la définition de l'indice de viscosité proposé par ASTM [33].

I.2.5.1.3. Variation de viscosité avec la pression

La plupart des huiles lubrifiantes ont une viscosité qui croît avec la pression. Ce phénomène présente une importance pratique car dans certains mécanismes le lubrifiant subit des pressions qui peuvent atteindre $109Pa$, c'est le cas en particulier dans les roulements et les engrenages.

Notons encore que les fluides de faible viscosité sont moins affectés par une augmentation de pression que les fluides de grande viscosité. Pour caractériser cet effet, dit « effet piézo-visqueux »

On peut utiliser la relation de Barus [34-36] :

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p} \quad (I.12)$$

Où p est la pression, μ_0 la viscosité dynamique à la pression atmosphérique et α le coefficient de piézo-viscosité qui dépend de l'huile. Mesure de la viscosité.

L'effet piézo-visqueux du lubrifiant doit être pris en compte car il pilote la mise sous pression du lubrifiant et gouverne en partie l'établissement des films lubrifiants en régime de film complet [37].

I.2.5.2. Densité

La densité est le rapport entre la masse volumique du produit à une température donnée, et la masse volumique du corps de référence qui est en générale celle de l'eau, à une température standard.

I.2.5.3. Indice de viscosité

Pour déterminer l'indice de viscosité d'une huile de viscosité U à $40^\circ C$ et P à $100^\circ C$, on recherche les viscosités respectives L et H à $40^\circ C$ des huiles de références à caractères paraffinique et naphténique ayant la viscosité P à $100^\circ C$ (Figure.I.3). L'indice de viscosité VI (Viscosity Index) est alors donné par [38]:

$$VI = 100 \frac{L-U}{L-H} \quad (I.13)$$

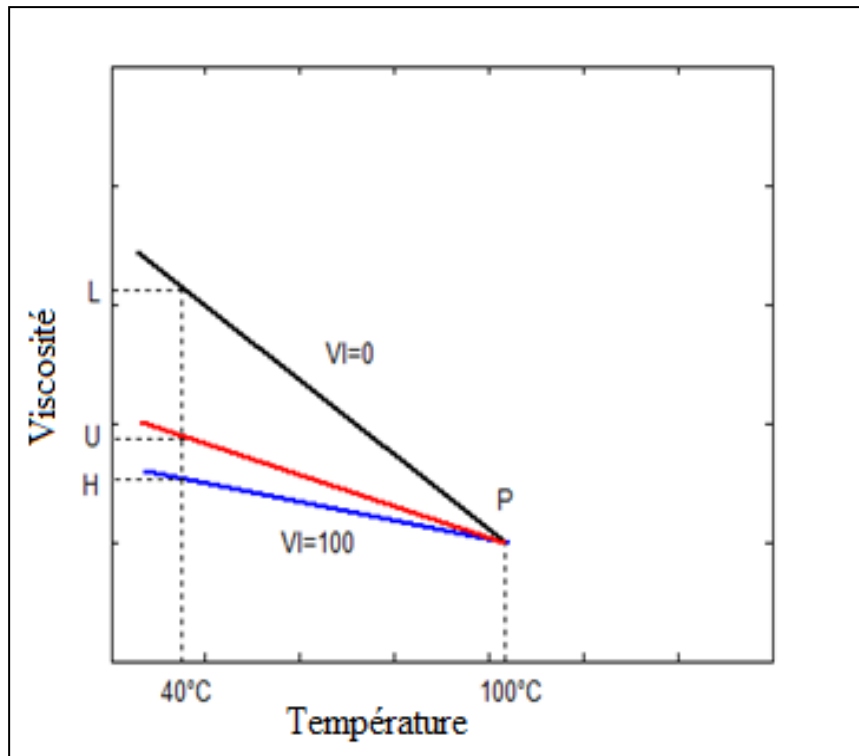


Figure. I.3. Définition de l'indice de viscosité.

I.2.5.4. Masse volumique

La masse volumique ou la masse spécifique d'un lubrifiant à une température donnée est la masse de l'unité de volume. Elle diminue légèrement lorsque la température s'élève.

I.2.5.5. Couleur

La couleur d'une huile minérale est évaluée par comparaison avec des verres étalons numérotés en colorations N.P.A. (National Petroleum Association). Elle varie généralement du blanc pur au rouge foncé en passant par le jaune citron et le jaune orange. Les additifs assombrissent pratiquement la couleur de l'huile de base. Certains les noircissent complètement (graphite, bisulfure de molybdène...etc.). La couleur de l'huile change progressivement au cours de son utilisation. En particulier pour les huiles moteurs qui deviennent rapidement noires en se chargeant de suies et des résidus de la combustion. La couleur foncée d'un lubrifiant usagé est un très bon moyen d'apprécier son altération. Aussi, la présence de la mayonnaise indique qu'il y a de l'eau [39].

I.2.5.6. Chaleur massique

La chaleur massique d'un lubrifiant est la quantité de chaleur fournie à l'unité de masse sous l'effet d'un gradient thermique élevant sa température de 1 Kelvin. Elle est exprimée en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (généralement, de l'ordre de $2 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Elle augmente avec la température et diminue avec la densité [39].

I.2.5.7. Masse molaire

La masse molaire est définie comme un rapport entre la masse est la quantité de matière, elle se mesure en Kg/mole [22].

I.2.5.8. Indice de réfraction

C'est un nombre (n) sans dimension, qui permet d'identifier un produit ou une espèce chimique, et de contrôler leurs puretés, et déterminer leurs fractions molaires. Sa définition repose sur le résultat du rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide qui dépende de la longueur d'onde et de la température, avec la vitesse de la lumière du milieu transparent considéré [22].

I.2.5.9. Point éclair

Le point éclair est la température minimale à laquelle les constituants volatils de l'huile peuvent être brûlés au contact d'une flamme. Pour des raisons de sécurité, cette caractéristique est toujours prise en compte dans les spécifications des lubrifiants. Il est exprimé en degré Celsius, elle traduit la stabilité thermique de l'huile et sa résistance à l'inflammation [17]. Il existe différentes méthodes pour déterminer le point d'éclair des huiles telles qu'elles sont mentionnées dans la norme ASTM [40].

I.2.5.10. Point d'écoulement

Le point écoulement est la température à laquelle l'huile se solidifie en formant des cristaux en paraffine, qui s'accumulent. Au point d'écoulement, l'huile perd la caractérisation d'écoulement. Ce dernier est très important pour l'usage des huiles moteur à basse température.

I.2.5.11. Indice d'acidité ou dosage de l'acidité totale (TAN)

C'est le nombre de milligramme de potasse, nécessaire pour neutraliser les acides contenus dans 1 gramme d'huile. L'apparition de l'acidité dans une huile moteur, ne peut provenir que lors de l'oxydation, et pour cela son augmentation indique une oxydation due à la température ou à la contamination.

I.2.5.12. Indice de basicité ou dosage de basicité totale (TBN) :

C'est le nombre de milligramme de potasse stœchiométrique, équivalent à la quantité d'acidité d'une huile, renfermant des additifs alcalins. L'indice de basicité a pour but de neutraliser les acides formés dans des gaz de combustion, ou par oxydation. Il est inversement proportionnel à l'indice de basicité [22].

I.2.5.13. Teneur en eau :

C'est la quantité d'eau contenant dans une huile moteur lors de son service, et elle augmente en fonction de son usage. L'eau c'est un très mauvais lubrifiant en milieu métallique, il provient des fuites, de vapeurs émises par l'huile lors de hautes températures, et autres. L'eau cause beaucoup d'inconvénients pour la lubrification du moteur, tel que le vieillissement prématuré de l'huile, la formation d'émulsion, la corrosion de pièces métalliques et la perte de pouvoir visqueux.

I.2.5.14. Onctuosité

Elle caractérise l'aptitude d'une huile à adhérer aux surfaces sous forme d'une fine couche. On l'améliore par des additifs de base.

I.2.6. Classification des huiles

Les huiles de lubrification produites doivent répondre à des spécifications et des normes fixées par les constructeurs des systèmes à lubrifier et aux cahiers de charge des organismes utilisateurs. Il existe plusieurs classifications des lubrifiants dont les critères de classifications diffèrent.

I.2.6.1. Classification ISO

Applicables aux huiles industrielles, elle classe les huiles à partir de leur viscosité. Désignation : lettres ISO VG suivi du nombre précisant la viscosité cinématique à 40°C en centistoke.

Tableau. I.2. Classification ISO de la viscosité des huiles

Classification ISO de la viscosité des huiles		
Classes ISO de viscosité	Limites de viscosité cSt à 40 C°	Valeur moyenne de la viscosité
ISO VG 2	1.98 à 2.42	2.2
ISO VG 3	2.88 à 3.52	3.2
ISO VG 5	4.14 à 5.06	4.6
ISO VG 7	6.12 à 7.48	6.8
ISO VG 10	9.00 à 11.0	10
ISO VG 15	13.5 à 16.5	15
ISO VG 22	19.8 à 24.2	22
ISO VG 32	28.8 à 35.2	32
ISO VG 46	41.4 à 50.6	46
ISO VG 68	61.2 à 74.8	68
ISO VG 68	90.0 à 110	100
ISO VG 100	135 à 165	150
ISO VG 150	198 à 242	220
ISO VG 320	288 à 352	320
ISO VG 460	414 à 506	460
ISO VG 680	612 à 748	680
ISO VG 1000	900 à 1100	1000
ISO VG 1500	1350 à 1650	1500

I.2.6.2. Classification SAE

La classification internationale adaptée pour les huiles pour moteurs et les huiles pour transmissions est celle de la SAE américaine (Society of Automotive Engineers) [41], Elle est essentiellement utilisée dans l'automobile et les véhicules industriels pour les moteurs et les

transmissions. Elle classe aussi les huiles selon leur viscosité, mais définit des tranches ou des intervalles continus de viscosité avec un minimum et un maximum.

La classification SAE 20, SAE 30... Utilise la viscosité des huiles à 100°C et correspond aux huiles monogrades dites pour "hautes" températures.

La classification SAE 0W, SAE 5W... (avec W = winter) utilise la viscosité des huiles à -18°C et correspond aux huiles monogrades dites pour "basses" températures ou "hiver".

Les huiles multigrades présentent deux viscosités caractéristiques. Une huile SAE 10W-40 a même viscosité qu'une huile monograde SAE 40 à 100°C et même viscosité qu'une huile monograde SAE 10W à -18°C.

Les huiles multigrades présentent un meilleur indice de viscosité que les huiles monogrades correspondantes, autrement dit, leur viscosité varie moins avec la température. De plus, elles couvrent trois classes de viscosité (contre une classe pour les monogrades) et assurent une bonne lubrification à haute et basse température.

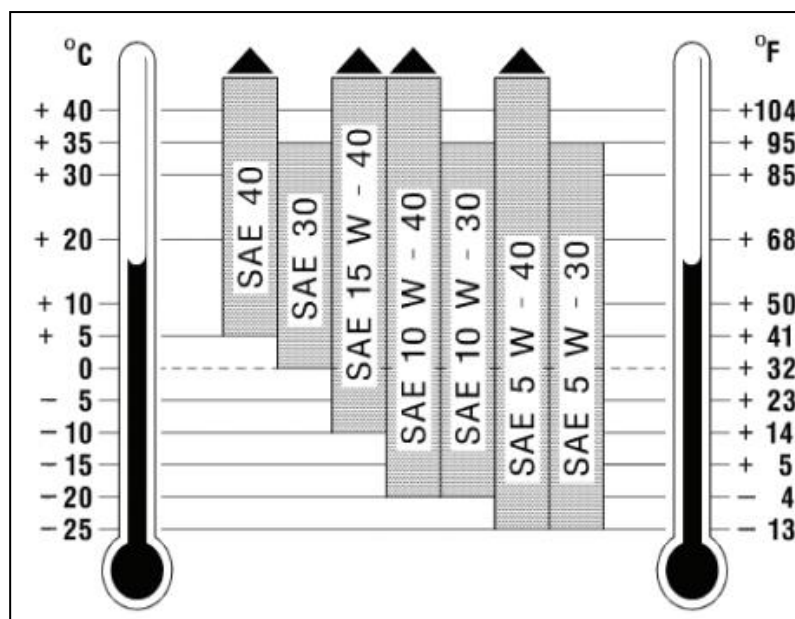


Figure. I.4. Plages de viscosité en fonction de la température pour la classification SAE.

I.2.6.3. Classification européennes

Parmi les classifications européennes nous citons l'A.C.E.A (Association des Constructeurs Européens d'Automobile). Elle a été créée en 1991 en remplacement de la classification C.C.M.C (Comité des constructeurs d'automobile du marché commun) fondée

en 1972. Elle établit des séquences fixées en 1996 en trois catégories ; A pour les moteurs essence, B pour les moteurs diesel de tourisme et E pour les moteurs diesel de poids lourds et utilitaires. Chaque séquence comporte 4 ou 5 appellations, notées de 1 à 5.

- A1 et B1 : les lubrifiants de hautes performance,
- A2 et B2 : les lubrifiants standards,
- A3 et B3 : les lubrifiants supérieurs,
- A5 et B5 : les lubrifiants de hautes performance réalisant des économies de carburant,
- B4 : les lubrifiants pour moteurs diesel à injection directe de véhicules de tourisme,
- E1, E2, E3, E4 et E5 représentent les niveaux de performances croissants.

I.2.7. Dégradation des huiles lubrifiantes

I.2.7.1. Phénomènes d'oxydation

Une réaction chimique de type oxydo-réduction dégrade le lubrifiant en présence d'oxygène. La théorie des réactions en chaînes de radicaux libres s'applique au phénomène d'oxydation des hydrocarbures. Les radicaux libres sont des molécules comportant au moins un électron libre dans une couche externe. Ils sont capables d'extraire un électron des molécules voisines pour combler la vacance de leur couche externe et possèdent une grande réactivité chimique. [42] proposent un mécanisme d'oxydation des huiles moteur en plusieurs étapes. Selon eux, l'oxydation du lubrifiant est initiée par des radicaux libres provenant de la combustion. Afin de lutter contre le mécanisme d'oxydation, des additifs inhibiteurs de radicaux libres (antioxydants) sont utilisés [43].

I.2.7.2. Phénomènes de nitration

Les gaz produits dans la chambre de combustion génèrent des oxydes d'azote ($\text{NO}_x = \text{NO}$ et NO_2) qui forment, par réactions chimiques, des produits corrosifs et vont ensuite rejoindre le bas moteur via l'assemblage SPC [44]. Les interactions des NO_x avec le package d'additifs et les composants de l'huile de base sont présentées comme une source importante de consommation des antioxydants [43].

I.2.7.3. Contaminations solides et liquides

Les huiles lubrifiantes peuvent être contaminées par des particules métalliques provenant de l'usure des moteurs, par les impuretés des composés de plomb, ou par l'eau ou du carburant provenant à partir de la combustion du carburant dans le moteur [45].

La pollution par les liquides concerne la dilution de carburant, le liquide de refroidissement et l'eau [46]. Les deux effets majeurs de la contamination par les liquides sont une chute de viscosité et une consommation rapide des additifs antioxydants.

I.2.7.4. Cisaillement mécanique

Le cisaillement du lubrifiant est la contrainte que subit le film d'huile lorsque ses deux faces sont animées de vitesses différentes, il s'exprime par la variation de vitesse dans le film d'huile. L'aptitude d'un lubrifiant à résister au cisaillement lui permet de garantir des caractéristiques stables pendant sa durée de vie [47].

I.2.8. Différents régimes de lubrification

Les conditions dans lesquelles les premiers corps sont séparés par le troisième sont appelées régimes de fonctionnement du contact. Leurs spécificités reposent sur l'existence d'un lubrifiant visqueux, en film complet ou non, permettant de réduire le frottement et l'usure entre les deux surfaces frottantes. L'épaisseur du film d'huile dépend de la vitesse relative, de la viscosité du fluide et de l'effort normal appliqué.

Si les deux surfaces sont séparées par un film d'huile complet, la force de frottement est due au cisaillement du film. Si par contre elles ne sont pas complètement séparées, la force de frottement dépend également de l'interaction des aspérités à la surface des massifs.

I.2.8.1. Courbe de Stribeck

Selon le régime dans lequel le contact fonctionne, les mécanismes générant le frottement sont différents. La différence de comportement entre les trois régimes est visible sur une courbe donnant l'évolution du coefficient de frottement en fonction d'un paramètre qui égal au produit de la vitesse par la viscosité, divisé par la charge normale. Ce type de courbe est appelée courbe de Stribeck [48].

Cette courbe se divise en trois zones distinctes qui révèlent trois principaux régimes de lubrification, caractérisés par l'épaisseur relative du film de lubrifiant par rapport à la rugosité des surfaces : le régime hydrodynamique, le régime limite et le régime mixte [49].

Le passage d'un régime à un autre dépend, d'une part, des conditions de vitesse, de pression ainsi que de la viscosité du lubrifiant qui détermine l'épaisseur de film entre les deux surfaces antagonistes, et d'autre part, de la rugosité des surfaces.

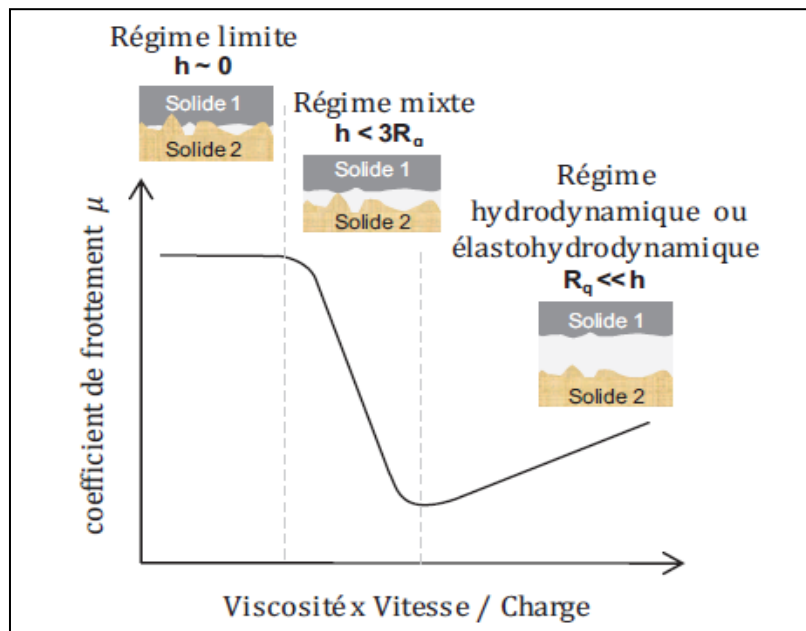


Figure. I.5. Représentation schématique des différents régimes de lubrification sur une courbe de Stribeck.

I.2.8.2. Lubrification limite

Aux fortes pressions et faibles vitesses d'entraînement, la séparation des surfaces est essentiellement due aux molécules d'huile adsorbées. Ce type de lubrification qui correspond à la zone I de la courbe Stribeck (figure.I.5). La valeur de frottement est due au contact direct entre les aspérités des deux surfaces. Le coefficient de frottement est donc élevé et constant. Il dépend du type de surfaces en contact et de la présence ou non d'un film d'additifs protecteur sur ces surfaces [48,43].

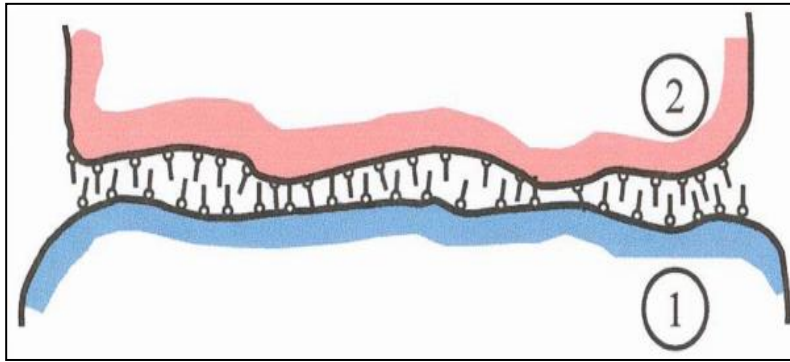


Figure. I.6. Représentation de la lubrification limite

I.2.8.3. La lubrification mixte

Dans ce régime, le frottement est à la fois lié aux effets visqueux dans le lubrifiant et au cisaillement à l'interface entre les aspérités. Il diminue rapidement avant d'atteindre un minimum au moment où le film devient suffisamment épais pour passer en régime complet. A partir de là, le frottement est légèrement croissant avec le paramètre L car le cisaillement dans le film augmente avec la vitesse et la viscosité.

Cette lubrification peut être considérée comme une transition entre la lubrification limite et la lubrification hydrodynamique.

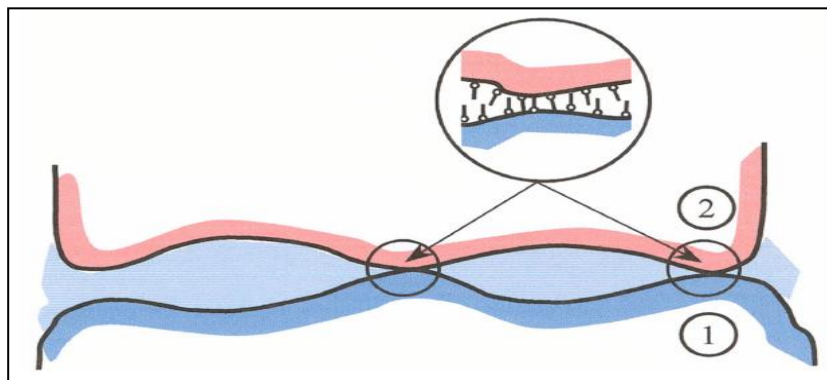


Figure. I.7. Représentation de la lubrification mixte

Ce type de lubrification existe jusqu'à ce que la vitesse des surfaces soit suffisante, pour que par effet hydrodynamique, le film lubrifiant sépare totalement les surfaces. La modélisation de la lubrification mixte est en cours de développement et fait l'objet de recherches actuelles car il s'agit d'associer des phénomènes physicochimiques à des phénomènes mécaniques, afin de développer des modèles qui prennent en compte ces

différents comportements. Le contact piston-segments-chemise au point mort haut et au point mort bas du cycle des moteurs à combustion interne correspond à ce type de lubrification.

I.2.8.4. Régimes de lubrification fluide

Dans les contacts lubrifiés, un film protecteur continu sépare les surfaces en contact. En fonction des conditions de fonctionnement, différents types de lubrification existent appelés aussi régimes de lubrification fluide (la troisième partie de la courbe de Stribeck). Dans ce cas, les surfaces du système lubrifié sont entièrement séparées par un film de lubrifiant. Selon la géométrie des surfaces en regard et selon la valeur des pressions exercées nous distinguons trois régimes de lubrification fluide :

Régime hydrostatique : C'est un régime de lubrification fluide dont la séparation des surfaces lubrifiées est assurée par une très forte mise en pression extérieure du lubrifiant due à un système d'alimentation. Cette pression permet la séparation totale des surfaces antagonistes en contact et équilibre la charge [50-52].

Régime hydrodynamique : C'est le régime de lubrification fluide qui présente un équilibre entre les efforts appliqués au niveau de l'épaisseur du film lubrifiant. La viscosité du lubrifiant constitue alors le paramètre essentiel jouant sur la formation du film de lubrifiant épais [51]. C'est le régime adopté pour les paliers lisses, contacts segments / piston / cylindre entre points morts...etc.

Régime élasto-hydrodynamique : Ce régime fait intervenir la déformation élastique des surfaces avec l'augmentation considérable de la viscosité du lubrifiant. Les fortes pressions de contact induisent la formation d'un film d'huile très résistant mais très mince . C'est le cas des cames poussoirs, cames patins, engrenage, roulement ...etc.

I.2.8.5. Régime du contact sec

En l'absence de lubrifiant liquide, le troisième corps est un lubrifiant solide, comme un agglomérat de débris détachés des premiers corps ou encore un film réactionnel comme les oxydes formés en surface. Dans de nombreuses circonstances, il est une combinaison de ces trois éléments, dont les interactions peuvent varier dans le temps en fonction des sollicitations. Ce régime peut également survenir en contact mixte, au niveau local des interactions entre les aspérités des surfaces

I.3.La lubrification d'un moteur à combustion interne

La lubrification d'un moteur à combustion interne assure la tenue mécanique, diminue les résistances dues aux frottements et limite l'usure des pièces en mouvement. Dans un moteur, une lubrification optimisée augmente le rendement en limitant les pertes mécaniques dues aux frottements. Cependant, le graissage couvre d'autres fonctions telles que l'évacuation de la chaleur ou encore la protection contre l'oxydation et la corrosion.

I.3.1. Fonctionnement d'un moteur diesel à quatre temps

Le moteur diesel quatre temps est un moteur alternatif à combustion interne où le cycle diesel se reproduit le long du fonctionnement moteur. Le principe pratique du moteur diesel quatre temps est de transformer l'énergie calorifique générée par la combustion d'un carburant en énergie mécanique traduite en mouvement de rotation à la sortie du moteur [52].

Le cycle Diesel d'un moteur à quatre temps comporte [53-55]: La phase d'admission commence par l'ouverture des soupapes d'admission, la soupape d'échappement étant fermée. Le piston descend du Point Mort Haut (PMH) au Point Mort Bas (PMB), aspirant l'air de l'extérieur.

Tout au long de la phase de compression, les deux soupapes sont fermées. La remontée du piston jusqu'au voisinage du point mort haut (PMH) entraîne la compression de l'air avec un rapport volumétrique élevé. La température en fin de compression atteint des valeurs comprises entre 600 et 800°C malgré les pertes thermiques aux parois. L'injection du gazole a lieu en fin de compression de l'air dans la chambre de combustion. L'échauffement dû à la compression amène le mélange air/gazole à une température qui favorise l'explosion.

Dans un moteur diesel, le carburant est enflammé avec un allumage par compression. L'élévation de la température et de la pression lors de la compression est suffisante pour provoquer l'auto-inflammation du carburant. Pendant la compression, la pression du cylindre augmente jusqu'à 170 bars.

Durant la phase de détente, les deux soupapes sont fermées. Il y a combustion du mélange air-carburant, ce qui entraîne le mouvement du piston vers le PMB. La phase se caractérise par l'augmentation du volume occupé par les gaz, et par la baisse de la pression dans la chambre à combustion.

La phase d'échappement débute avec l'ouverture de la soupape d'échappement, entraînant une dépression dans la chambre de combustion. Tandis que le piston remonte vers le PMH, les gaz brûlés sont éjectés vers l'extérieur. La fin de la phase d'admission débute le cycle suivant.

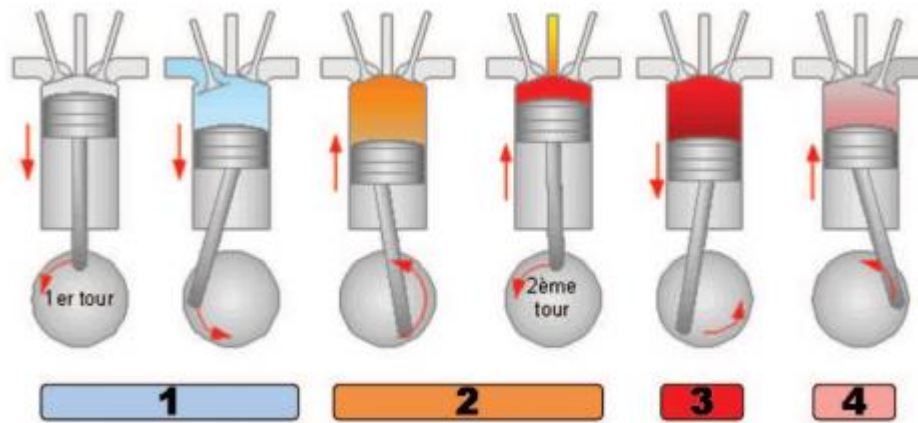


Figure. I.8. Cycle moteur à quatre temps

Les moteurs diesels rapides n'utilisent pas le cycle de Beau de Rochas ni le cycle de Diesel mais le cycle mixte, ce cycle consistait à diviser la phase de combustion en deux parties. La première est isochore, la deuxième est isobare. Il rassemble le processus de combustion de Diesel et celui de Beau de Rochas. Dans l'ordre A B C D E F (Figure.I.9) le cycle Diesel mixte est décrit comme suit :

- **a-b Admission :** le moteur aspire l'air. Partie isobare déterminée par une course de piston entre le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB), appelée phase d'admission.
- **B-C Partie adiabatique** déterminée par une course de piston entre le PMB et le PMH, appelée phase de compression.
- **C Injection:** la carburant est pulvérisé dans la chambre de combustion. Il s'enflamme spontanément au contact de l'air chauffé par la compression.
- **C-D Combustion à volume constante:** la première partie de la combustion se déroule si rapidement que le piston n'a pas le temps de se déplacer.
- **DE Combustion à pression constante:** la pression appuie sur le piston. L'augmentation de volume est compensée par la dilatation des gaz.
- **E-F Partie adiabatique** correspond à la première détente b-a Echappement.
- **F- B Partie isochore** correspond à la deuxième détente

- **B- A Partie isobare** correspond à la phase d'échappement

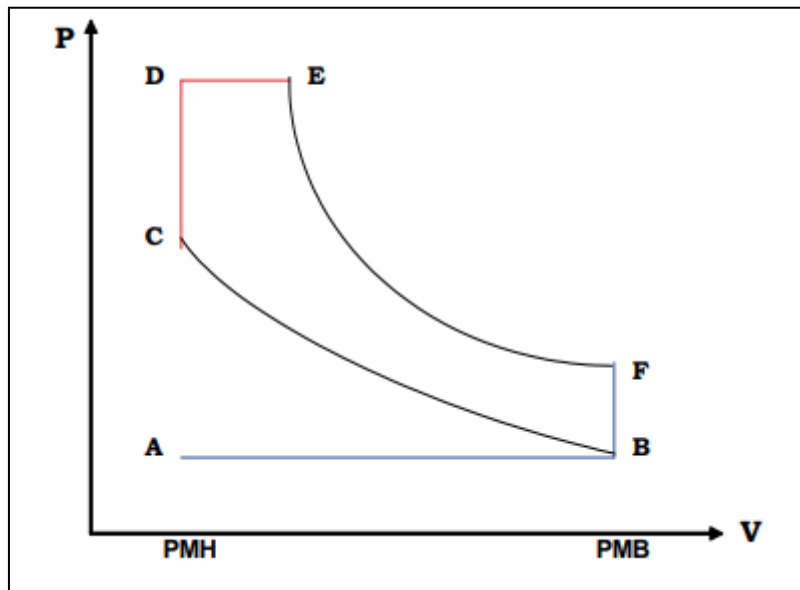


Figure. I.9. Cycle Diesel mixte quatre temps [56].

Le cycle Diesel mixte ou cycle de SABATHE est le cycle le plus proche au cycle réel tracé par l'indicateur de Watt pour moteur diesel (figure. I.10).

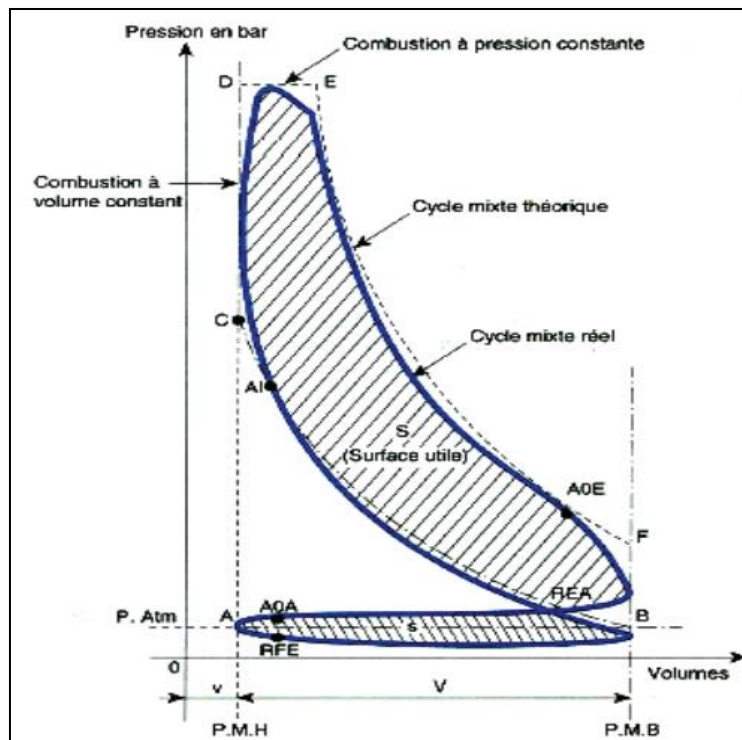


Figure. I.10. Cycle Réel diesel quatre temps

I.3.2. Avantages et inconvénients de moteurs diesel [57,58]

I.3.2.1. Avantages

- Le succès de moteur diesel est essentiellement à son rendement supérieur à celui du moteur à essence.
- Les gaz d'échappement sont moins toxiques puisque la teneur en oxyde de carbone est de 0.1% à 2%.
- Le carburant Diesel coûte environ 10 % moins cher que l'essence.
- La consommation moyenne est moins élevée que le moteur essence.
- L'huile végétale peut remplacer le gazole dans ce moteur.

I.3.2.2. Inconvénients

- Les moteurs Diesel au début étaient beaucoup plus lourds, bruyants et bien moins puissants que leurs homologues à essence. Ces inconvénients ont été partiellement éliminés sur les véhicules modernes grâce, au turbocompresseur à géométrie variable, aux rampes d'injection communes ou à l'injection très haute pression.
- La réduction du bruit sonore dépend beaucoup de la gestion de l'injection et des dispositifs d'insonorisation, néanmoins, des progrès sont encore à faire, les moteurs diesel étant toujours plus bruyants que ceux à essence.
- Le coût d'entretien est environ 20 % plus élevé que celui d'un moteur à essence
- les moteurs diesels restent plus lourds que leurs équivalents à essence ;
- De fortes contraintes thermiques et mécaniques sont exercées sur les composants mécaniques du moteur, d'où la nécessité de les surdimensionner.
- Dans le moteur diesel, la plage de fonctionnement en vitesse de rotation est plus petite que celle du moteur à essence, il est donc moins souple que son homologue à essence et a besoin de plus de rapports de vitesse.

I.3.3. Modes de la lubrification dans les moteurs

La lubrification d'un moteur à combustion interne assure la tenue mécanique, diminue les résistances dues aux frottements et limite l'usure des pièces en mouvement. Dans un moteur, une lubrification optimisée augmente le rendement en limitant les pertes mécaniques dues aux frottements. Cependant, le graissage couvre d'autres fonctions telles que l'évacuation de la

chaleur ou encore la protection contre l'oxydation et la corrosion. Dans un moteur à quatre temps, les éléments sont graissés de différentes manières [59] :

I.3.3.1. Graissage par barbotage

On parle de graissage par barbotage lorsque le moteur est lubrifié par un bain d'huile dans le carter (Figure.I.11) ; les pièces en mouvement projettent de l'huile sur les accessoires situés au-dessus du niveau d'huile. Ce système ne convient qu'à des moteurs peu sollicités.

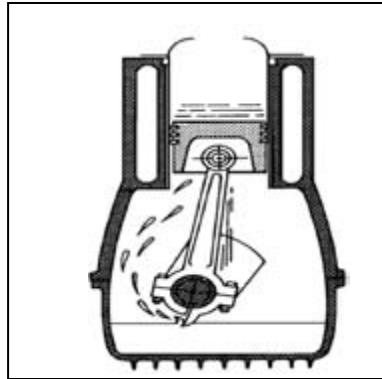


Figure. I.11. Graissage barbotage

I.3.3.2. Graissage sous pression

L'huile provenant de la rampe principale de graissage est dirigée par des canaux vers les paliers de vilebrequin (Figure.I.12). Les rainures des coussinets et un canal oblique permettent le graissage sous pression des têtes de bielle. Dans certains cas l'axe du piston est graissé sous pression grâce à un perçage pratiqué dans le corps de bielle.

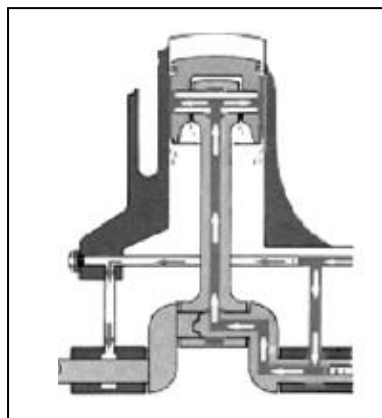


Figure. I.12. Graissage sous pression

I.3.3.3. Graissage par projection

L'huile sous pression s'échappant des manetons est projetée le long des parois de la chemise (Figure I.13). Elle assure ainsi le graissage entre le piston et la chemise, ainsi que l'axe du piston.

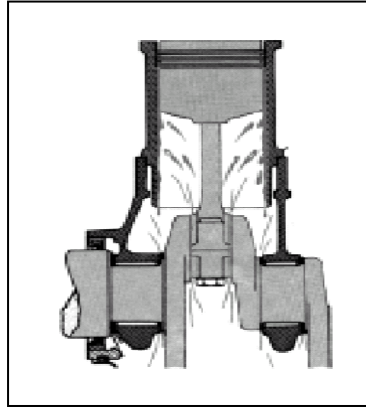


Figure. I.13. Graissage par projection

I.3.4. Circuit de lubrification

Le circuit de lubrification assure le maintien d'un film d'huile sur les composants et mécanismes mobiles internes au moteur diesel, il fonctionne dès la mise en route du moteur [60]. L'huile de moteur fournit un film de protection, pour éviter le contact métal/métal (usure) et pour réduire le frottement. L'huile aide aussi à évacuer la chaleur de certains composants du moteur, et à éliminer les particules d'usure. Il contribue également à l'étanchéité des segments de piston. Le circuit de lubrification du moteur à combustion comprend de nombreux composants (Figure I.14). Ce circuit est alimenté en huile par une pompe volumétrique. Avec ce type de pompe, la pression de l'huile dépend de la vitesse de rotation ainsi que de la viscosité de l'huile. Pour éviter les problèmes de détérioration du système d'huile causés par la pression, il est nécessaire de prévoir une pompe avec soupape de décharge de pression (soupape de décharge). Les impuretés, qui pourraient user les pièces du moteur, sont suspendues et filtrées dans l'huile. L'huile est ensuite distribuée aux différents composants soumis à des frictions (piston, arbre à cames) avant de descendre dans le carter [61].

Sur les moteurs plus petits, l'huile de lubrification est changée régulièrement afin de la maintenir propre. Sur les gros moteurs, un système de traitement est généralement connecté

au réservoir d'huile de graissage et des analyses d'huile sont effectuées pour maintenir l'huile en bon état [62].

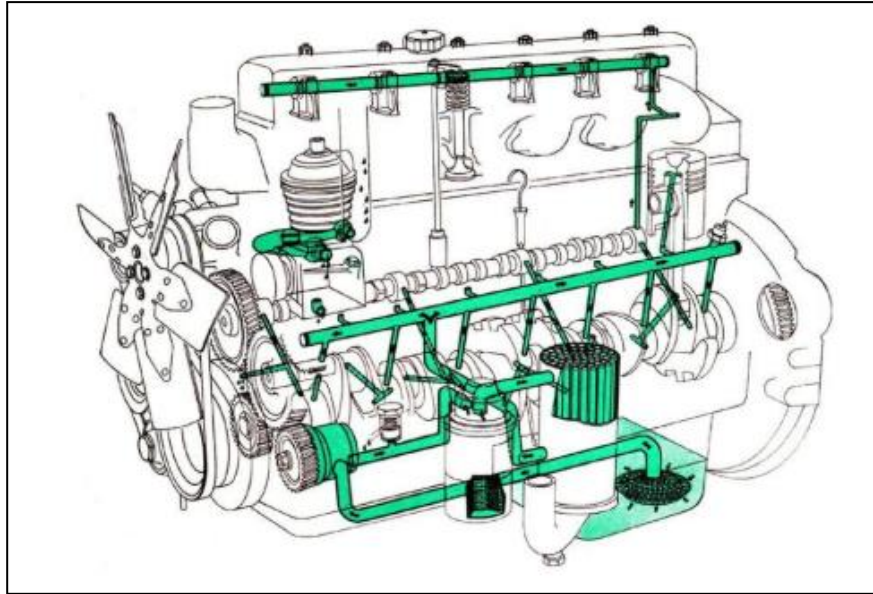


Figure. I.14. Le system de lubrification

I.3.5. Principaux éléments de circuit de la lubrification du moteur

I.3.5.1. Pompe à huile

Entraînée par l'arbre à came (engrenage) ou par le vilebrequin (chaîne), la pompe à huile assure la mise en pression de l'huile. Un clapet de décharge limite la pression. Il existe plusieurs types tel que : les pompe à engrenages, les pompes à rotor, les pompes à palettes (Figure.I.15)

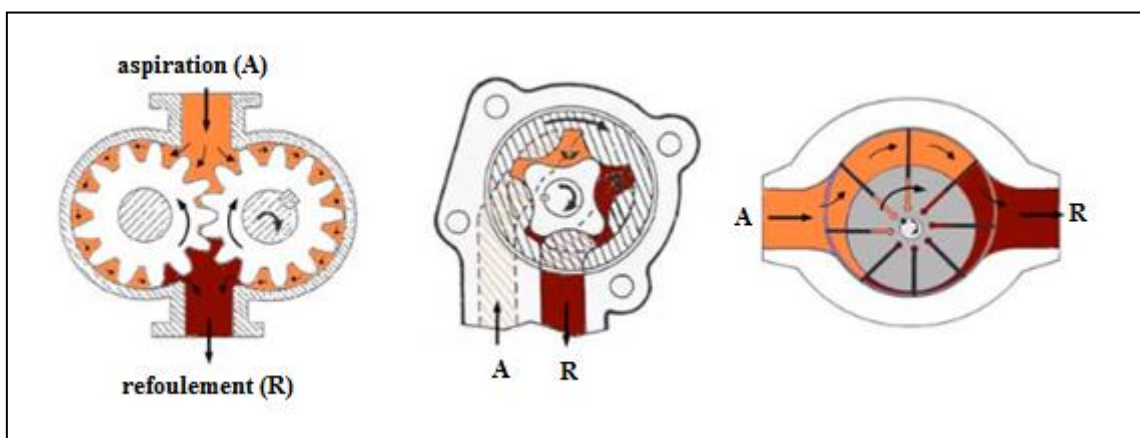


Figure.I.15. Pompes à engrenages, à rotor, à palettes respectivement [63]

I.3.5.2. Clapet de décharge

Tout en protégeant la pompe et le circuit, le clapet de décharge permet de limiter la pression à une valeur prédéfinie par le constructeur (5 à 8 bars).

Fonctionnement : Quand la pression d'huile dépasse la valeur de tarage du ressort, la bille ou le piston est repoussé et une partie de l'huile retourne au carter inférieur.

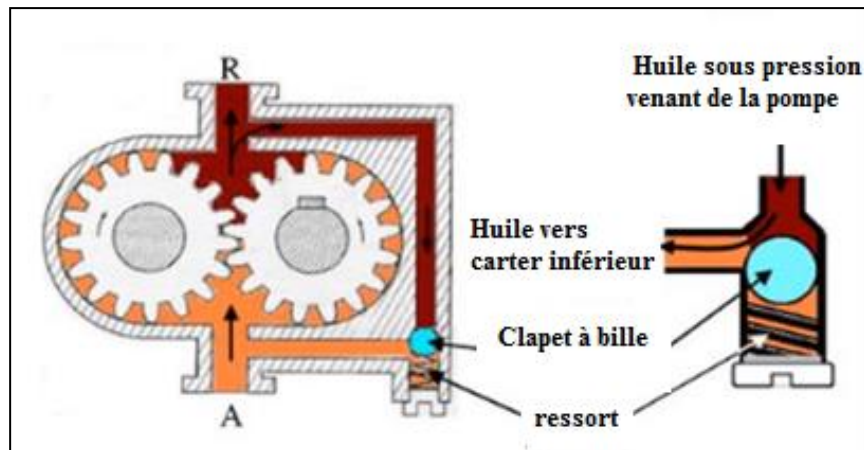


Figure. I.16. Le clapet de décharge

I.3.5.3. Filtre à huile

Le filtre, contenu dans une cartouche en tôle, est en générale en toile de coton ou en papier. En cas d'obstruction du filtre, on aurait une coupure du circuit d'huile et une montée en pression anormale dans le filtre. Pour éviter cela, le filtre est équipé d'un clapet de sécurité interne, qui permet à l'huile de rejoindre la rampe principale sans être filtrée.

Son rôle est d'éliminer les impuretés qui sont en suspension dans l'huile et qui pourraient altérer les pièces en fonctionnement. Ces impuretés peuvent être des particules métalliques provenant du rodage, des résidus de combustion ou des produits d'altération de l'huile.

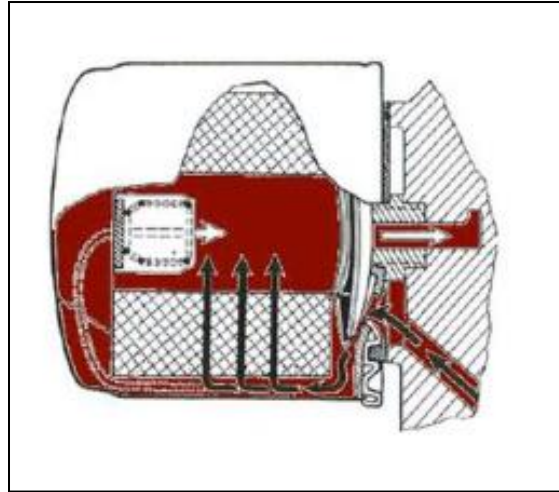


Figure. I.17. Le filtre à huile

I.3.5.4. Radiateur d'huile

Sur certains moteurs, le radiateur du moteur est accompagné d'un radiateur d'huile. Son rôle consiste à refroidir l'huile moteur car celle-ci est soumise à de fortes contraintes thermiques. Il est très important car dès la mise en route du moteur, l'huile joue un rôle de film de protection entre chacune des pièces mobiles internes du moteur. Celles-ci, sans cesse en friction, provoquent un échauffement des métaux et par conséquent de l'huile qui, en plus de lubrifier, assure un maintien de la température pouvant atteindre les 100°C voire 130°C selon le style de moteur [63].

I.3.6. Défauts de la lubrification des moteurs

I.3.6.1. Consommation anormale d'huile

Les moteurs présentent des différences très importantes dans les caractéristiques de consommation d'huile, en fonction du type de moteur et même au sein d'un même type. L'apparence de la courbe de consommation d'huile en fonction du temps ou du kilométrage dépend de nombreux facteurs, notamment l'utilisation du moteur, les types de segments, les pistons, les roulements et les pannes du moteur.

Une consommation d'huile se manifeste par la disparition de lubrifiant à l'intérieur du moteur lorsqu'il fonctionne. Cette légère consommation est nécessaire afin de réduire le frottement et l'usure des pièces mécaniques. L'huile moteur assure donc le bon fonctionnement des organes.

Toutefois, une consommation excessive d'huile doit alerter. Il faut rapidement analyser les symptômes, car une importante fuite (ou consommation) d'huile peut avoir des conséquences très graves sur la plupart des organes moteur [64].

On parle de consommation d'huile anormale lorsqu'un moteur consomme plus de 0.5 litre aux 1000 kilomètres.

On peut citer les causes principales de la consommation anormale de l'huile moteur [65] :

- Un vis de purge du carter: il s'agit d'un problème assez commun provenant le plus généralement d'un joint fatigué ou d'un serrage trop fort de la vis (si carter en aluminium).
- Un carter endommagé.
- Un joint de culasse: en cas de défaillance de joint de culasse, de l'huile peut s'échapper du moteur.
- Un problème lié au filtre à huile: facilement accessible il sera facile de vérifier son bon état de fonctionnement.
- La viscosité des huiles de carter est le principal facteur de consommation lors de la lubrification des moteurs. Normalement, plus la viscosité est basse, plus la consommation est importante.

I.3.6.2. Pollution ou la contamination

Les huiles lubrifiantes peuvent être contaminées par des particules métalliques provenant de l'usure des moteurs, par des particules solides telles que poussière, sable, par les impuretés des composés de plomb, ou par l'eau ou du carburant provenant à partir de la combustion du carburant dans le moteur.

La contamination des lubrifiants est l'une des principales causes de défaillance des équipements. Plusieurs études montrent en effet, que la durée de vie des équipements est fortement impactée par le nombre de particules et les niveaux d'humidité dans le lubrifiant [66].

La contamination va contribuer à augmenter le phénomène de gommage des segments. Elle va entraîner une diminution de l'efficacité du graissage par obstruction des différents canaux de passage d'huile

La contamination résulte : D'une mauvaise combustion, l'utilisation des moteurs à faible charge, une température de l'huile trop élevée et une mauvaise filtration [67].

Entrée de l'eau douce dans l'huile : Le sodium et le potassium entrent dans la composition de la très grande majorité des liquides de refroidissement. Leur présence dans l'huile signale donc un problème d'étanchéité entre le circuit d'huile et le circuit de refroidissement. Ces éléments chimiques sont détectés en utilisant la spectrométrie d'émission [68].

Lorsque la quantité d'eau introduite est importante, il y a formation d'émulsion stable avec risque d'obstruction des circuits, mauvaise lubrification des organes mobiles et diminution de la teneur en additifs du mélange.

I.3.6.3. Dilution

La dilution quantifie la proportion de carburant imbrulé récupéré par le lubrifiant. La valeur habituelle limite pour un moteur essence est de 5 % et de 1.5 % pour un diesel. Cette mesure effectuée par la spectrométrie infrarouge, est corrélée avec les valeurs de viscosité et du point éclair [69,70].

La dilution réduit la viscosité de l'huile et accélère l'usure [71], la faible viscosité due à la dilution de l'huile à mauvaise influence sur le maintien de la résistance du film d'huile et les pièces métalliques séparées, et par conséquent augmente l'usure des segments de piston et des roulements [72]

La dilution dégrade la qualité du graissage, elle peut provoquer aussi une baisse de la pression d'huile et éventuellement entraîner un échauffement anormal car pour cela la dilution doit être contrôlée tout les 24 heures et 2 heures après le lancement du moteur. En cas de dépassement de seuil le moteur doit être stoppé et la charge d'huile remplacée.

La dilution provient de marches à faible charge ou de fuites diverses (injecteurs, pompe nourrice ou d'injection, système d'injection, raccords, tuyautages

La dilution les plus fréquentes d'entrées de combustible dans le circuit d'huile sont [67] :

- Combustion incomplète ou gouttelettes de combustible qui, à la suite d'une mauvaise injection sur un ou plusieurs cylindres se déposent sur les parois du ou des cylindres intéressés.

- Les pompes nourrices qui sont fixées sur les moteurs et entraînées par un arbre sortant du carter, lorsque les garnitures ne sont pas étanches, le combustible chemine le long de cet arbre et pénètre dans le carter.
- L'auto lubrification des pistons des pompes à injection (pompes individuelles). Le combustible qui s'écoule doit être rigoureusement collecté, si l'on veut éviter son passage dans le carter de l'arbre à cames placé immédiatement au dessous des pompes
- Des fuites dues à des ruptures ou des défauts d'étanchéité sur les collecteurs de combustible circulant soit dans les carters de culbuteurs soit le long des moteurs.

I.3.6.4. Augmentation de la température de l'huile

L'huile lubrifiante perd de son efficacité à haute température, et cela à cause de la chaleur qui réduit sa viscosité et sa capacité à former un film.

L'augmentation de température a cause de Mauvaise refroidissement de l'huile du à [67] :

- Débit d'eau de refroidissement insuffisant ou la température de l'eau trop élevée.
- Mauvaise fonctionnement de la soupape thermostatique.
- Encrassement du réfrigérant coté eau et/ou huiles.
- Circuit de refroidissement d'eau défectueux :
- Pompe à eau défectueuse.
- Soupape thermostatique défectueuse

Par conséquences :

- Perte des qualités de l'huile
- Usure prématurée de certaines pièces
- Risque d'avaries graves

I.3.6.5. Pression d'huile insuffisante :

Diverses raisons peuvent être à l'origine d'une baisse de la pression d'huile. Une pression d'huile moteur insuffisante peut causer une casse moteur. Il convient donc de faire preuve de vigilance. Voyons ensemble quelles sont les causes d'une baisse de pression d'huile et quels sont les moyens d'y remédier.

Une insuffisance de pression d'huile moteur peut être la conséquence d'un dysfonctionnement d'une pièce.

Défectuosité du capteur de pression d'huile : Le bon fonctionnement du capteur de pression d'huile assure la lubrification du moteur ainsi que de tous les éléments internes. De plus, le capteur contribue au refroidissement des pièces soumises à des chocs thermiques comme les bielles, les cylindres, les roulements et les pistons [73].

Un capteur défaillant peut causer une fuite d'huile, ce qui entraîne une augmentation de la température de l'huile et donc l'usure de certains éléments du moteur. Un dysfonctionnement du capteur entraîne le plus souvent une absence d'étanchéité dans la chambre de compression, ce qui peut endommager tous les éléments du capteur.

Usure de la pompe à huile : La pompe à huile a pour rôle de faire circuler l'huile moteur afin de lubrifier les composants du moteur. Cela permet d'éviter une usure prématurée des pièces et de réduire leur friction. La pompe aspire l'huile au fond du carter puis la propulse dans le bloc moteur et la culasse. Une baisse du niveau d'huile moteur peut donc entraîner une défaillance de la pompe à huile.

Une pression d'huile moteur insuffisante exige une intervention. Celle-ci se traduit souvent par le remplacement de la pompe à huile ou encore du capteur de la pression d'huile [73].

I.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de comprendre l'importance de la lubrification et le lubrifiant dans le fonctionnement des moteurs diesels. Nous avons compris que leurs rôles est de séparer au mieux les organes en mouvements tout en réduisant les frottements afin de limiter l'usure des pièces métalliques.

La qualité de l'huile de lubrification utilisée dans le moteur diesel joue un rôle important dans la prolongation de la durée de vie du moteur et dans l'amélioration des performances de ce dernier.

Chapitre II : Processus stochastique et chaînes de Markov

II.1. Introduction.....	37
II.2. Variable aléatoire.....	37
II.3. Processus stochastique.....	37
II.3.1. Définitions.....	38
II.3.2. Propriétés des processus.....	38
II.4. Processus de Markov.....	39
II.5. Processus de Lévy.....	40
II.6. Processus de Poisson.....	40
II.7. Processus Gamma.....	42
II.8. Processus de Wiener.....	43
II.9. Réseaux bayésiens (RB).....	44
II.10. Chaînes de Markov.....	45
II.10.1. Définition.....	45
II.10.2. Diverses applications des chaînes de Markov.....	45
II.10.3. Propriété forte de Markov.....	46
II.10.4. Probabilité de transition.....	46
II.10.5. L'équation de Chapman-Kolmogorov.....	47
II.10.6. Matrice de transition.....	47
II.10.7. Régime transitoire.....	49
II.10.8. Régime permanent.....	50
II.10.9. Classification des états.....	50
II.10.10. Périodicité.....	51
II.10.11. Chaînes de Markov irréductibles.....	52
II.10.12. Chaîne de Markov homogène.....	52
II.10.13. Chaîne de Markov régulière.....	53
II.11. Conclusion.....	53

II.1. Introduction

Les modèles stochastiques sont des représentations de systèmes dynamiques basées sur les probabilités. L'étude des processus stochastiques a commencé au 17ème siècle avec Pascal et s'est poursuivie au XXème siècle grâce à un mathématicien Russe, Markov Andreï Andreïevitch. Son étude statistique du langage l'a conduit à formuler l'hypothèse markovienne, qui peut se résumer ainsi : « L'évolution future d'un système ne dépend que de son état présent ».

Nous allons étudier dans ce chapitre les processus stochastiques qui permettent une description mathématique nombreux phénomènes aléatoires rencontrés dans la pratique (La physique, la biologie, ...), et en particulier, nous nous focaliserons sur les chaînes de Markov.

II.2. Variable aléatoire :

Une expérience est qualifiée d'aléatoire si son résultat ne peut être prévu à l'avance et si, répétée dans des conditions identiques, elle peut donner lieu à des résultats différents [74] :

- Succession d'appels à un standard téléphonique non surchargé ;
- Observation de la durée de vie d'un individu anonyme dans une population ;
- Observation de la durée de fonctionnement sans panne d'appareil ;
- Jeu de pile ou face.

Une variable dont la valeur est déterminée en fonction du résultat d'une expérience aléatoire est appelée variable aléatoire.

Une variable aléatoire est dite discrète si l'ensemble des valeurs qu'elle peut prendre est fini (dénombrable) et est dite continue si cet ensemble est un intervalle ou une union d'intervalles (non dénombrable).

II.3. Processus stochastiques :

Historiquement, la théorie des probabilités a été développée pour la modélisation des jeux de hasard. Selon le probabiliste Émile Borel « le hasard n'est que le nom donné à notre ignorance et n'existerait pas pour un être omniscient ». En mathématiques, les probabilités ne visent pas à comprendre la nature profonde du hasard mais à permettre la modélisation de systèmes aléatoires ou en partie aléatoires afin de mieux les comprendre et éventuellement en

prédire l'évolution. Il s'agit donc de prendre en compte l'effet de tout ce qui n'a pas été observé ou mesuré mais qui peut pourtant influencer le résultat de l'expérience ou du phénomène observé. Pour cela nous faisons appel à des modèles qui sont des abstractions des phénomènes, ou au moins d'une partie des phénomènes, construites en se basant sur les expérimentations ou les observations. La modélisation consiste à formaliser en langage mathématique un système afin de plus facilement pouvoir l'étudier et le comprendre [75].

Les processus stochastiques sont utilisés pour représenter des phénomènes qui varient d'une façon irrégulière en temps et en espace [76]. En d'autres termes, tout processus dont l'évolution peut être analysée en termes de probabilité est un processus stochastique.

II.3.1. Définitions

Un processus stochastique $\{X_t, t \geq 0\}$ est une fonction du temps dont la valeur à chaque instant dépend de l'issue d'une expérience aléatoire. Un processus stochastique est donc une famille de variables aléatoires (non indépendantes).

On appelle espace des états l'ensemble S ou les variables $\{X_t\}$ prennent leurs valeurs. Cet espace peut être discret ou continu. De même, le temps peut être discret ou continu.

Une trajectoire d'un processus est décrit par un couple (espace, temps). Par conséquent, on distingue quatre types de processus :

- Suite stochastique à espace d'états discret ;
- Suite stochastique à espace d'états continu ;
- Processus continu à espace d'états discret ;
- Processus continu à espace d'états continu.

En particulier, si l'ensemble S est fini ou dénombrable le processus est appelé une chaîne [77].

II.3.2. Propriétés des processus :

- Un processus X_t est strictement stationnaire si pour tout entier n et pour tous réels t_1, t_2, \dots, t_n et pour tout h , les variables aléatoires $X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n}$ et $X_{t_1+h}, X_{t_2+h}, \dots, X_{t_n+h}$ ont même loi.

- Un processus X_t est stationnaire (ou faiblement stationnaire) si son espérance $E(X_t)$ est une constante indépendante du temps t et sa fonction de corrélation $R(s, t)$ ne dépend que de la différence $\tau = t - s$, ainsi que $R(\tau)$ est continu.
- Un processus X_t est un processus à accroissements indépendants si pour tous réels $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$, les variables aléatoires $X_{t_0}, X_{t_1} - X_{t_0}, \dots, X_{t_n} - X_{t_{n-1}}$ sont indépendantes. Si X_t est un processus à accroissements indépendants, alors pour tout s et t tels que $0 \leq s \leq t$, $X_t - X_s$ est indépendant de $\mathfrak{F}_s = (X_u, U \leq s)$. La loi de X_t entièrement déterminée par la loi de $X_t - X_s$.
- Un processus X_t est un processus à accroissements indépendants stationnaires si X_t est un processus à accroissements indépendants et si $X_t - X_s$ à même loi que X_{t-s} . Si X_t est un processus à accroissements indépendants.
- Un processus X_t est gaussien si pour tout entier n et pour tous réels t_1, t_2, \dots, t_n les variables aléatoires $X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n}$ ont une distribution gaussienne. Si on note $m(t)$ l'espérance de X_t et $R(s, t)$ la fonction de corrélation du processus.

II.4. Processus de Markov

En probabilité un processus stochastique vérifie la propriété de Markov si et seulement si la distribution conditionnelle de probabilité des états futurs, étant donné les états passés et l'état présent, ne dépend en fait que de l'état présent et non pas des états passés (absence de mémoire). Un processus qui possède cette propriété est appelé processus de Markov. Pour de tels processus, la meilleure prévision qu'on puisse faire du futur, connaissant le passé et le présent, est identique à la meilleure prévision qu'on puisse faire du futur, connaissant uniquement le présent : si on connaît le présent, la connaissance du passé n'apporte pas d'information supplémentaire utile pour la prédiction du futur.

Propriété markovienne est souvent une hypothèse souvent faite pour faciliter l'étude d'un processus stochastique $\{X_t\} = \{X_0, X_1, \dots\}$.

Le processus stochastique $\{X_t\} = \{X_0, X_1, \dots\}$ possède la propriété markovienne si :

$$P(X_{t+1} = j | X_0 = k_0, X_1 = k_1, \dots, X_t = i) = P(X_{t+1} = j | X_t = i) \quad (\text{II.1})$$

Probabilité conditionnelle de l'état demain X_{t+1} étant donné les états passés $(0, 1, \dots, t-1)$ et de celui d'aujourd'hui t est indépendante des états passés, probabilité conditionnelle de l'état de demain X_{t+1} dépend uniquement de l'état d'aujourd'hui X_t .

II.5. Processus de Lévy

Soit $X(t)$ un processus stochastique à temps continu (ou discret) défini sur un espace d'état DY .

Processus à accroissements indépendants On dit que $X(t)$ est un processus à accroissements indépendants si, pour tout $n \in \mathbb{N}$ et pour tous $0 \leq t_0 \leq \dots \leq t_n < +\infty$,

Les variables aléatoires $X(t_{j+1}) - X(t_j)$ pour $0 \leq j \leq n-1$ sont indépendantes. Autrement dit, les incréments calculés sur des intervalles de temps sans chevauchement sont des variables aléatoires indépendantes.

Processus à accroissements stationnaires On dit que $Y(t)$ est à accroissements stationnaires si, pour tous $t_i, t_j > 0$, la variable aléatoire $Y(t_i + t_j) - Y(t_i)$ suit la même loi que $Y(t_j) - Y(0)$. Autrement dit, la loi de chaque incrément ne dépend que de l'intervalle du temps écoulé.

Processus de Lévy On dit que $Y(t)$ est un processus de Lévy si [78] :

- $Y(0) = 0$ presque sûrement,
- $Y(t)$ est à accroissements indépendants et stationnaires,
- $Y(t)$ est stochastiquement continu c.à.d. pour tout $\varepsilon > 0$, $t > 0$ et $t \geq 0$:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} P[|Y(t + \Delta t) - Y(t)| > \varepsilon] = 0 \quad (\text{II.2})$$

II.6. Processus de Poisson

Un processus de Poisson (PP) nommé d'après le mathématicien français Siméon Denis Poisson et la loi du même nom, est un processus de Lévy défini sur un espace de temps continu. Ce processus est largement utilisé dans la modélisation des phénomènes aléatoires pour décrire les instants d'occurrence d'un événement récurrent. Le processus de Poisson est un cas particulier des processus ponctuels [79].

On appelle processus ponctuel sur \mathbb{R} la trace de la suite croissante $(T_n)_{n \geq 1}$ des variables aléatoires positives signalant les instants où se produit un événement [80]. Associé à ce processus on définit :

- La fonction aléatoire appelée fonction de comptage $N(t)$ et définie sur l'espace des entiers naturels pour $t \geq 0$ par :

$$N(t) = \sum_{n \geq 1} 1_{\{T_n \leq t\}} \quad (\text{II.3})$$

Cette fonction décrit le nombre d'événements se produisant jusqu'à l'instant t .

- La loi du processus $(T_n)_{n \geq 1}$ et celle du processus $(N(t))_{t \geq 0}$ sont liées par la relation suivante :

$$P(T_1 \leq t_1, T_2 \leq t_2, \dots, T_n \leq t_n) = P(N(t_1) \geq 1, N(t_2) \geq 2, \dots, N(t_n) \geq n) \quad (\text{II.4})$$

- La variable aléatoire de temps d'attente, également nommée temps d'inter-occurrence $\Delta T_i = (T_{i+1} - T_i)$ décrit le délai entre deux événements successifs.

Le processus ponctuel $(T_n)_{n \geq 1}$ est dit un processus de Poisson homogène de taux λ si les variables de temps inter-occurrence $(T_i)_{i \geq 1}$ sont indépendantes et identiquement distribuées suivent la même loi exponentielle de paramètre λ . Dans ce cas, la variable aléatoire $N(t)$ pour tout $t \geq 0$ est de loi de Poisson de paramètre λt d'où le nom du "Processus de Poisson".

Un processus de Poisson homogène de taux λ et de fonction de comptage $N(t)$ vérifie les propriétés suivantes [80] :

- $N(0) = 0$ presque sûrement.
- le processus $N(t)$ est un processus markovien, continu à droite, et à accroissements indépendants.
- pour $0 \leq s \leq t$ la variable aléatoire $N(t) - N(s)$ suit la loi de Poisson de paramètre $\lambda(t - s)$:

$$P(N(t) - N(s) = n) = \frac{(\lambda(t-s))^n}{n!} e^{-\lambda(t-s)} \quad (\text{II.5})$$

Une forme plus compliquée de processus de Poisson est le processus de Poisson non homogène. Le taux d'un processus de Poisson non-homogène est défini comme une fonction de temps. On dit que le processus de Poisson est non-homogène d'intensité $d\Lambda$ s'il existe une mesure positive $d\Lambda$ sur \mathbb{R}_+ tel que :

$$\Lambda(t) = \int_{[0,t]} d\Lambda(s) \quad (\text{II.6})$$

Et la variable aléatoire $N(t)$ suit une loi de Poisson de paramètre $\Lambda(t)$ pour tout $t \geq 0$ [80].

Généralement pour ce processus, les variables de temps inter-occurrence $(\Delta T_i)_{i \geq 1}$ ne sont plus indépendantes ni identiquement distribuées.

II.7. Processus Gamma

Le processus gamma étant un processus à espace d'état continu et à accroissements positifs, il permet de modéliser les mécanismes de vieillissement qui sont par nature lents, continus et progressifs (en particulier, les défauts considérés ne se résorbent pas et ne se stabilisent pas non plus).

D'autres caractéristiques de ce processus sont a priori intéressantes pour modéliser les mécanismes de dégradation : l'indépendance des accroissements, le fait de pouvoir formuler une hypothèse de stationnarité (ou de non stationnarité) des accroissements sur laquelle les experts peuvent apporter de l'information, et enfin, le fait de pouvoir formuler une hypothèse sur la tendance moyenne de l'évolution des dégradations [80].

Le processus gamma doit son nom à loi Gamma dont densité sous probabilité s'écrit de la forme suivante :

$$f_{\alpha,\beta}(x) = \frac{\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x}}{\Gamma(\alpha)} \quad (\text{II.7})$$

Où α et β sont respectivement les deux paramètres de forme et d'échelle de la loi Gamma, $\Gamma(x)$ est la fonction Gamma d'Euler définie par :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (\text{II.8})$$

Dans sa forme la plus simple un processus gamma homogène de paramètre (α, β) est défini comme un processus stochastique $\{Y(t), t \geq 0\}$ ayant les propriétés suivantes :

- $Y(0) = 0$,

- Les incréments de ce processus sont indépendants, positifs ou nuls,
- Pour tout $0 < s < t$, la variable aléatoire d'incrément $(Y(t) - Y(s))$ suit une loi gamma $f_{\alpha(t-s),\beta}$.

Dans le cas homogène, ce processus présente une tendance moyenne linéaire avec une espérance d'accroissement :

$$E[Y(t) - Y(s)] = \frac{\alpha(t-s)}{\beta} \quad (\text{II.9})$$

Un processus gamma non-homogène est caractérisé par une distribution non-homogène des incréments. Dans ce cas, la loi de la distribution de la variable aléatoire $(Y(t) - Y(s))$ est définie à partir d'une fonction $\varphi(t)$ non-négative, monotone et croissante qui s'introduit dans le paramètre de forme de la manière suivante :

$$(Y(t) - Y(s)) \sim f_{\alpha(\varphi(t)-\varphi(s)),\beta} \quad (\text{II.10})$$

II.8. Processus de Wiener

Historiquement, le mouvement brownien est associé à l'analyse de mouvements qui évoluent au cours du temps de manière si désordonnée qu'il semble difficile de prévoir leur évolution, même dans un intervalle de temps très court. Il joue un rôle central dans la théorie des processus aléatoires, parce que dans de nombreux problèmes théoriques ou appliqués, le mouvement brownien ou les diffusions que l'on en déduit fournissent des modèles limites simples sur lesquels de nombreux calculs peuvent être faits.

Le terme mouvement Brownien se réfère au nom du botaniste Robert Brown qui observa en 1827 le mouvement irrégulier de particules de pollen en suspension dans un liquide. Près d'un siècle plus tard, en 1923, Wiener proposait une formulation mathématique décrivant ce mouvement.

Le processus de Wiener fréquemment utilisé pour modéliser et rendre compte du mouvement brownien (MB), le bruit, l'aléa pur, l'erreur de mesure physique [81-84], ainsi qu'il fait l'objet de larges applications dans l'analyse des données de dégradation ainsi que des données financières.

Définition : On considère un espace de probabilité (Ω, A, P) . Un processus $(B_t)_{t \geq 0}$ est un processus de Wiener standard s'il satisfait les propriétés suivantes :

1. $B_0(\omega) = 0$ pour tout $\omega \in \Omega$,
2. $t \rightarrow (B_t(\omega))$ est une fonction continue, pour tout $\omega \in \Omega$,
3. Les accroissements de $(B_t)_{t \geq 0}$ sont indépendants et pour tout $t > 0$ et $h > 0$ $B_{t+h} - B_t$ suit la loi normale $N(0, h)$.

Soit X_0, X_1, \dots, X_n , une suite de variables aléatoires définies sur un même espace de probabilité (Ω, A, P) et à valeurs dans χ .

II.9. Réseaux bayésiens (RB)

Basé sur les probabilités conditionnelles et dérivé du théorème de Bayes, cet outil permet d'établir une prévision du futur à partir du passé [85]. Il utilise deux composantes :

- Un graphe causal orienté et acyclique ; les nœuds représentent les variables d'intérêt du domaine, les arcs les relations de dépendance entre ces variables (le graphe est une représentation qualitative de la connaissance),
- Un ensemble de distributions locales de probabilités qui constituent les paramètres du réseau ; chaque nœud comporte une table de probabilité représentant la distribution locale de probabilité qui ne dépend que de l'état des parents du nœud (les tables sont une représentation quantitative de la connaissance).

Formule de Bayes : Il y a des faits, désignés par A ou B, qui ont des probabilités d'arriver $P(a)$ et $P(b)$. $P(\sim A)$ est la probabilité que non A arrive. La formule de Bayese dit que :

$$P(A|B) = P(A, B)/P(B) \quad (\text{II.11})$$

Ou encore :

$$P(A|B) = P(B|A).P(A)/P(B) \quad (\text{II.12})$$

Etant donné que :

$$P(B) = P(B|A).P(A) + P(B|\sim A).P(\sim A) \quad (\text{II.13})$$

On écrit alors:

$$P(A|B) = P(B|A).P(A)/(P(B|A).P(A) + P(B|\sim A).P(\sim A)) \quad (\text{II.14})$$

La formule de Bayes peut être conditionnée par un fait X:

$$P(A|B, X) = P(B|A, X) \cdot P(A, X) / P(B, X) \quad (\text{II.15})$$

Une évidence utile à préciser:

$$P(A|B) + P(\sim A|B) = 1 \quad (\text{II.16})$$

II.10. Chaînes de Markov

II.10.1. Définition

La suite $(X_n)_{n \in N}$ est une chaîne de Markov si pour tout $n \in N$ et pour tout $(i_1, \dots, i_{n+1}) \in \chi^{n+1}$ tel que $P(X_n = i_n, X_{n-i} = i_{n-i}, \dots, X_0 = i_0) > 0$,

$$P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) \quad (\text{II.17})$$

Ne dépend que des valeurs de n , i_n et i_{n+1} . L'ensemble χ est appelé l'espace des états de la chaîne de Markov $(X_n)_{n \in N}$.

Autrement on peut dire une suite $(X_n)_n$ est une chaîne de Markov signifie que pour tout $n \in N$, X_{n+1} est indépendant du vecteur aléatoire (X_0, \dots, X_{n-1}) conditionnellement à la variable aléatoire X_n . Les états successifs d'un système peuvent donc être décrits par une chaîne de Markov si la connaissance de l'état du système à l'instant présent apporte autant d'information sur le futur que la connaissance de tout le passé. Les chaînes de Markov sont des processus sans mémoire.

II.10.2. Diverses applications des chaînes de Markov

Les chaînes de Markov sont les modèles mathématiques les plus simples pour les phénomènes aléatoires qui évoluent dans le temps. Leur structure est suffisamment simple pour que l'on puisse en dire beaucoup sur leur comportement. Pourtant, la classe des chaînes de Markov est suffisamment riche pour servir dans de nombreuses applications. En effet, les chaînes de Markov sont les premiers et les plus importants exemples de modèles stochastiques qui apparaissent dans des domaines aussi divers, on peut citer quelque domaine et leur application par exemple :

- En génie civile [86-89] : Les chaînes de Markov sont les techniques stochastiques les plus couramment utilisées pour prédire la performance des diverses infrastructures des

installations telles que les autoroutes, les ponts, les conduites d'égout et les conduites d'eau [90].

- En biologie [91,92] : Les chaînes de Markov utilisés pour prédire l'emplacement des protéines dans les cellules [92]. Les modèles de Markov sont des outils bien connus d'analyse des données des séquences biologiques. Ils ont été utilisés pour détecter de nouveaux gènes issus de cadres de lecture ouverts [93,94].
- En médecine [95,96] : L'application des chaînes de Markov en médecine bien que récente est de plus en plus fréquente [97] ; elle permet de modéliser des situations cliniques complexes où des évènements peuvent survenir plus d'une fois avec des probabilités qui varient dans le temps.

Les chaînes de Markov sont largement utilisées dans nombreux applications [98-101], notamment dans la prédiction [102-104], telles que les précipitations prédiction [105, 106], prévision d'économie [107, 108].

Plus d'informations sur les chaînes de Markov seront présenté dans la section suivante

II.10.3. Propriété forte de Markov

La propriété forte de Markov s'énonce de la manière suivante :

Soit $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une chaîne de Markov d'espace d'états χ . Pour tout $n \in \mathbb{N}$ et pour tout $(i_1, \dots, i_{n+1}) \in \chi^{n+1}$ tel que $P(X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) > 0$, on a

$$P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n).$$

Cette propriété d'oubli du passé constitue la définition classique des chaînes de Markov [109].

II.10.4. Probabilité de transition

Considérons un processus aléatoire avec une suite finie d'états, le temps est une variable discrète. Si le processus passe d'un état i à un état j , nous dirons qu'il y a changement d'état $i \rightarrow j$ (de i vers j).

La chaîne de Markov dépend des probabilités de transition données par P_{ij} [110], la probabilité de transition entre deux moments consécutifs t et $(t + 1)$.

$\forall i, j \in \{0, \dots, M\}$:

$$P_{ij} = P(X_{t+1} = j | X_t = i) = P(X_1 = j | X_0 = i) \quad (\text{II.8})$$

Notation :

- P_{ij} La probabilité d'aller de l'état i à l'état j .
- $P_{ij}^{(n)}$. La probabilité d'aller de l'état i à l'état j en n pas.

II.10.5. L'équation de Chapman-Kolmogorov

Les équations de Chapman-Kolmogorov permettent de déterminer les probabilités de transitions $P_{ij}^{(n)}$ à partir des probabilités de transition entre deux moments consécutifs P_{ij} , $\forall (i, j) \in \{0, \dots, M\}$, $m = \{1, 2, \dots, n-1\}$, et $n = \{m+1, m+2, \dots\}$

$$P_{ij}^{(m+n)} = \sum_k P_{ik}^{(m)} P_{kj}^{(n)} \quad (\text{II.19})$$

L'équation (II.19) c'est l'équation de Chapman- Kolmogorov.

II.10.6. La matrice de transition

Une chaîne de Markov peut être représentée par une matrice représentant les probabilités de passer d'un état à un autre. Lorsque le nombre d'états est fini, la matrice sera elle aussi de taille finie. Si la chaîne de Markov a N états possibles, la matrice sera une matrice $N \times N$, telle que l'entrée (i, j) représente la probabilité de passer de l'état i à l'état j , Sachant qu'une matrice de transition de Markov est spécifiée par:

- Les coefficients (P_{ij}) soient toujours inférieurs ou égale à 1.
- La somme des coefficients de la même ligne soit égale 1.

Voici la matrice de transition $\forall (i, j) \in \{0, \dots, r\}^2$:

$$M = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & \dots & P_{1r} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & P_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{r1} & P_{r2} & P_{r3} & \dots & P_{rr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

II.10.6.1. Définition

Étant donnée une chaîne de Markov à temps discret $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ à valeurs dans \mathcal{X} , la matrice $M = [M_{ij}]$ définie par :

$$M_{ij} = P(X_{n+1} = j | X_n = i) \quad (\text{II.21})$$

II.10.6.2. Propriétés de la matrice de transition

- Tout les termes sont positifs ou nuls ;
- La somme des termes sur une ligne est égale à 1.
- Les termes d'un ligne donné constituent donc une loi de probabilité appelée loi de transition de l'état correspondant à l'indice de la ligne.

La matrice M est une matrice stochastique, c'est-à-dire $\forall (i, j) \in \{0, \dots, r\}^2$:

- $0 \leq P_{ij} \leq 1$,
- $\sum_{j=1}^r P_{ij} = 1$.

II.10.6.3. Graphe associé à une matrice de transition

Pour visualiser l'évolution d'une chaîne de Markov, il est souvent utile de représenter la matrice de transition M de la chaîne de Markov par un graphe orienté : les nœuds du graphe sont les états possibles pour la chaîne de Markov, une flèche allant de l'état i à l'état j indique qu'il y a une probabilité strictement positive que le prochain état de la chaîne soit l'état j si elle est actuellement dans l'état i . On met le poids P_{ij} à la flèche allant de l'état i à l'état j .

Le graphe GM est appelé graphe de Markov ».

Remarque :

- Les poids des arcs sont alors des probabilités (nombres réels compris entre 0 et 1).
- Un graphe probabiliste indique les différents états possibles d'un système (sommets du graphe) et les probabilités de passage d'un état à l'autre (poids des arcs).

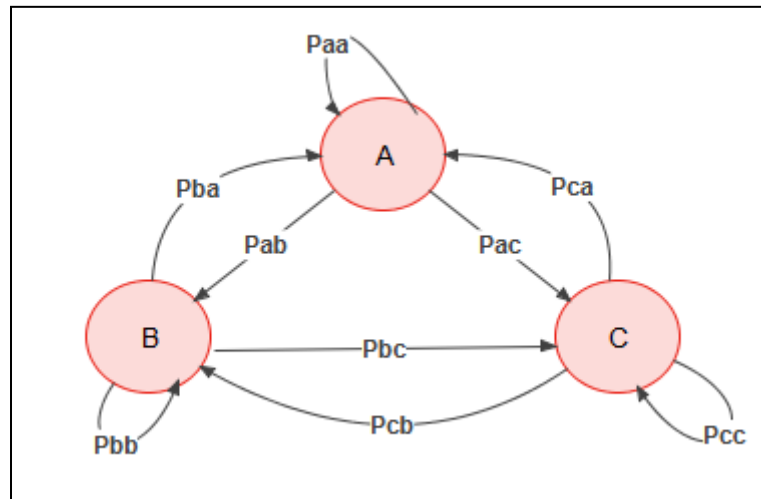


Figure.II.1. Graphe de Markov a trois états

II.10.7. Régime transitoire

L'analyse du régime transitoire d'une chaîne de Markov consiste à déterminer le vecteur $p_{(n)}$ des probabilités d'être dans un état j à l'étape n .

Ce vecteur de probabilités dépend :

- de la matrice de transition M .
- du vecteur de probabilités initiales $P_{(0)}$.

Ce qui peut s'écrire matriciellement :

$$p_{(n)} = p_{(0)} M^n \quad (\text{II.22})$$

$p_{(n)}$: Le vecteur des Probabilité à l'étape n .

M : La matrice de transition.

$p_{(0)}$: Vecteur des Probabilités initiales (à $t=0$).

Ou :

$$P_{(n)} = P_{(n-1)}M \quad (\text{II.23})$$

$P_{(n-1)}$: Le vecteur des Probabilité à l'étape $n - 1$.

II.10.8. Régime permanent

L'analyse du régime permanent consiste à $p_{(n)}$ trouver une limite lorsque n tend vers l'infini. Cette limite existe mais sous certaines conditions sur la chaîne de Markov.

II.10.9. Classification des états

II.10.9.1. Accessibilité d'un état

On dira qu'un état j est accessible à partir d'un état i , s'il ya une probabilité strictement positive d'atteindre l'état j à partir de l'état i en un nombre fini de transitions

L'état j est accessible de l'état i si et seulement si il existe $n \geq 0$ tel que $p_{ij}^n \geq 0$. En termes de graphes : il existe un chemin entre i et j .

II.10.9.2. Communication entre états

Les états i et j sont communiquent si l'état i est accessible à partir de l'état j et l'état j est accessible à partir de l'état i .

Les états i et j et communiquent (c'est à dire qu'il est possible de passer de l'état i à l'état j) si et seulement si il existe $n \geq 0$ et $m \geq 0$ tels que $p_{ij}^n \geq 0$ et $p_{ji}^m \geq 0$.

- i communique avec lui-même $p_{ii}^0 = P(X_0 = i | X_0 = i) = 1$.
- i communique avec $j \Leftrightarrow j$ communique avec i .
- i communique avec k et k communique avec $j \Leftrightarrow i$ communique avec j .
- La relation communiquer (\leftrightarrow) est une relation d'équivalence.

II.10.9.3. Etat stable

On appelle état stable un état probabiliste qui n'évolue pas lors de la répétition de l'expérience.

- L'état p est appelé état stable du système si il vérifie l'égalité $PM = P$

II.10.9.4. Etat absorbant

L'état i est un état absorbant si après y avoir accédé, le processus ne peut en repartir.

- i est absorbant si et seulement si $p_{ii} = 1$ (ona alors $p_{ij} = 0$ si $i \neq j$).

II.10.9.5. Etat transient

L'état i est un état transient si après y avoir accédé, le processus peut ne plus y revenir:

- i est transient $\exists j (\neq i)$ accessible de i , mais i n'est pas accessible de j .

II.10.9.6. Etat récurrent

L'état i est un état récurrent si après y avoir accédé, le processus y reviendra.

- i est récurrent $\Leftrightarrow i$ n'est pas transient.

II.10.9.7. Une classe

Une classe est un sous-ensemble de tous les états communiquant entre eux.

- Une classe récurrente (ou persistante) s'il est impossible de la quitter, elle composée d'un seul état est absorbante.
- Une classe est récurrente si elle correspond à un sommet sans successeur dans le graphe des composantes connexes. Les états d'une classe récurrente sont récurrents.
- Une classe est récurrente si elle correspond à un sommet sans successeur de graphe réduit, dans le cas contraire la classe est transitoire.

II.10.10. Périodicité

On définit d la période d'un état j comme la Plus Grand Commun Diviseur (PGCD) de tout l'entiers $n \geq 1$ pour les quels $P_{jj}^{(n)} > 0$.

- Tous les états d'une classe ont même période.
- Si au moins un état d'une classe est tel que $P_{jj}^{(1)} = P_{jj} > 0$, alors tous les états de cette classe sont de période 1 et la classe est dite apériodique.
- L'état i est périodique lorsque $d > 1$ et apériodique lorsque $d = 1$.
- Une chaîne de Markov est apériodique si chaque état a une période 0 ou 1.

II.10.11. Chaînes de Markov irréductibles

Une chaîne de Markov est dite irréductible lorsque tous ses états communiquent, c'est-à-dire lorsque, pour toute paire d'états (i, j) la probabilité d'aller de l'un à l'autre est strictement positive. Cette propriété peut se lire généralement sur le diagramme en points et flèches. En effet, on s'assure que la chaîne est irréductible en vérifiant que chaque paire de points est reliée soit par une flèche unique soit par une succession de flèches.

Une chaîne présentant un état absorbant ne peut pas être irréductible, car il n'y a pas de flèche allant de l'état absorbant vers l'un quelconque des autres états.

Une chaîne de Markov est dite irréductible si elle ne compte qu'une seule classe et ne contient aucun sous-ensemble fermé, elle est dite réductible dans le cas contraire.

Une chaîne est irréductible si tout état est accessible à partir de n'importe quel autre état avec une probabilité non nulle [111].

II.10.12. Chaîne de Markov homogène

Avec la modélisation d'un système par une chaîne de Markov, on peut connaître l'évolution du système à l'instant suivant grâce à la matrice de transition et l'état présent, ce qui pourrait également être intéressant, est de connaître l'évolution du système sur plusieurs échelles de temps : à court terme, à moyen terme et à long terme, il faudrait donc estimer toutes les matrices de transition futures à l'instant présent pour un système dont son évolution dépend du temps. Dans ce cas, la chaîne de Markov utilisée est non homogène. Les chaînes de Markov homogènes considèrent que la probabilité de passer d'un état au suivant ne dépend pas du temps. Il s'agit d'une hypothèse d'invariance de la matrice de transition au cours du temps, appelée hypothèse d'homogénéité. Autrement dit qu'une chaîne de Markov est homogène si :

- Quelque soit $n \in \mathbb{N}$ $P_{ij}^n = P_{ij}$. Cette hypothèse revient à dire que les chances de passer d'un état i à l'état j sont les même dans le temps.

II.10.13. Chaîne de Markov régulière

Une chaîne de Markov est régulière s'il existe une puissance de la matrice des probabilités de transition dont tous les éléments sont strictement positifs.

La particularité des chaînes régulières est qu'on peut aller de n'importe quel état vers n'importe quel autre en un nombre fixé de pas k , où k est indépendant de l'état de départ.

II.11. Conclusion

Les modèles stochastiques ont été utilisés parce qu'ils permettent une meilleure modélisation des phénomènes aléatoires qui évoluent dans le temps.

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelque processus stochastiques et les chaînes de Markov en particulier, avec une explication détaillée de leurs éléments essentiels (matrice et probabilité de transition), leurs types, et les concepts de base de la théorie des chaînes de Markov qui seront utiles dans notre travail.

Chapitre III : Etude expérimentale sur la dégradation de la viscosité de l'huile SAE40

III.1. Introduction.....	54
III.2. Matériels et méthodes.....	54
III.2.1. L'huile SAE 40.....	54
III.2.2. Moteurs à combustion de type POYAUD-DIESEL.....	55
III.2.3. Mesure de la viscosité.....	60
III.3. Résultats et discussion.....	63
III.4. Conclusion.....	68

III.1. Introduction

L'utilisation d'un lubrifiant est très importante dans un moteur à combustion interne, la qualité de ce dernier joue un rôle important dans la prolongation de la durée de vie du moteur et dans l'amélioration des performances d'un moteur.

L'un des facteurs physico-chimiques majeurs de la qualité et de l'efficacité de lubrifiant c'est la viscosité, ce qui nécessite une surveillance régulière de ce paramètre.

Dans ce chapitre nous avons réalisé une étude expérimentale sur la dégradation de la viscosité de l'huile CHILIA SAE 40 qu'est utilisée pour la lubrification des moteurs des locotracteurs dans des conceptions de complexe sidérurgique, afin de déterminer le temps de fonctionnement optimal de cette huile.

III.2. Matériels et méthodes employés

Notre étude expérimentale a été réalisée sur neuf moteurs de type : « POYAUD - DIESEL », ces derniers équipant les locotracteurs qui travaillent au sein du complexe sidérurgique «EL- HADJAR», ils sont exploités dans des conceptions très sévères. Après une durée de fonctionnement bien déterminée des moteurs ciblés (50 h de service), nous avons pris des échantillons d'huile de graissage afin d'analyser sa viscosité au sein de laboratoire du complexe.

III.2.1. Huile CHELIA SAE 40

L'huile CHELIA SAE 40 est une huile mono-grade obtenue d'une dérivée du pétrole, fabriquée par NAFTEC-SONATRACH, elle est recommandée pour la lubrification des moteurs diesels rapides et suralimentés fonctionnant dans les conditions plus sévères. Les caractéristiques physico-chimiques de cette huile sont les suivantes:

Tableau.III.1. Caractéristique de l'huile SAE 40

Caractéristiques	Unité	Valeur min	Valeur max	Valeur typique
Densité à 15°C		0.888	0.900	0.890
Viscosité à 40°C	cSt	-	170	150
Viscosité à 100°C	cSt	14	15	14.5
Indice de viscosité	cSt	95	-	98
Point d'éclaire	°c	200	-	208
Point d'éclaire	°c	245	-	255
Point d'écoulement	°c	-	-9	-12
Cendre sulfatées	%pds	1.04	1.39	1.17
Résidu Conradson	%pds	1.1	1.6	1.35
Teneur en soufre	%pds	-	1.5	1.27
Teneur en phosphore	%pds	0.067	0.09	0.072
Teneur en Ca	%pds	0.34	0.40	0.37
Teneur en Zn	%pds	0.08	0.12	0.10

III.2.2. Moteurs à combustion de type POYAUD-DIESEL

Nous avons pris dans cette étude comme exemple les moteurs POYAUD DIESEL, ils équipent les locotracteurs qui travaillent au sein du complexe sidérurgique en assurant l'alimentation des ateliers en matière première d'une part et le transport des produits semi finis et finis d'autre part.

Le moteur POYAUD DIESEL appartient au type des moteurs à injection directe avec une chambre de combustion non divisée. Le combustible est injecté directement dans le cylindre, ce qui facilite le démarrage à froid et rend les bougies de chauffage inutiles, il en résulte également une grande simplicité de la culasse ainsi que du piston et en conséquence une consommation particulière faible du combustible.

Tableau.III.2. Caractéristiques de moteurs POYAUD-DIESEL

Caractéristiques	Valeurs
N° moteurs	15568-15569
Type moteur	A12150
Vitesse	1500 tr/min
Puissance nominale	842 CV
Alésage	150mm
Course	180 mm
Cylindrée totale	38.17 litres
Quantité d'air aspirée	3789m ³ /h
Capacité cuvette d'huile max	90 litre
Capacité cuvette d'huile min	74 litre
Quantité consommable	16 litre
Autonomie de marche	13 heures

**Figure.III.1.** Moteur Poyaud Diesel A 12150 SCr1-V12 [112]

III.2.2.1. Sens de rotation :

Le sens de rotation normal du moteur POYAUD DIESEL, est celui inverse d'horloge pour un observateur placé coté volant (Moteur SIH. Norme R96201).

Le sens de rotation inverse exige une modification importante du moteurs elle n'est fait que sur commande spéciale (SH).

III.2.2.2. Numérotage des cylindres

Le moteur est composé de 12 cylindres disposés en V en 45°. La numérotation des cylindres est conforme à la norme R11002. Pour un observateur placé en face du volant, en s'éloignant, le numérotage s'effectue dans l'ordre croissant.

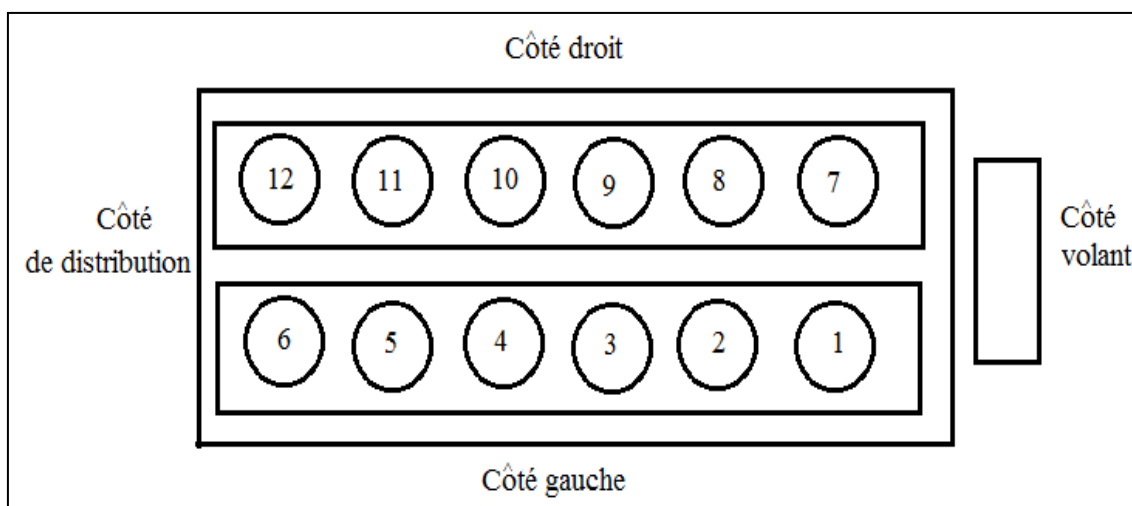


Figure.III.2. Numérotation des cylindres

III.2.2.3. Ordre d'allumage

L'allumage du moteur s'effectue en respectant l'ordre suivant : 1 8 5 10 3 7 6 11 2 9 4 12, dont le sens de rotation du moteur SIH (normal).

III.2.2.4. Lubrification de moteur

La lubrification ou graissage est une opération qui consiste à établir un film lubrifiant entre les pièces en mouvement relatif, afin d'éviter leur grippage d'un côté et de réduire les frottements d'autre coté.

La lubrification des moteurs en question est assurée par de l'huile conduite sous pression vers les organes à lubrifier : maneton, tourillon, arbre à came, culbuteurs, la distribution.....

L'huile est contenue dans le carter du moteur qui forme le réservoir. Pendant le fonctionnement, une pompe de graissage, aspire continuellement de l'huile sous pression au travers d'un filtre, puis dans un réseau de canalisations distribuant l'huile vers tous les points à graisser.

La pression d'huile (environ 4 bars) est limitée par une soupape tarée située dans le circuit principale de refoulement.

Le graissage des têtes de bielles est assuré depuis les paliers par des canalisations percées obliquement sur le vilebrequin. L'huile se dirige dans ces canalisations et arrive ainsi jusqu'aux têtes de bielles. Ensuite elle s'introduit entre les manetons et les têtes de bielles, elle se trouve projetée en gouttelettes contre les cylindres qu'elles lubrifient, ainsi que sur la face interne piston qu'elle refroidit. Enfin, après avoir accompli ce circuit, l'huile chaude retourne dans le carter inférieur.

Le graissage des pieds de bielles et des axes de pistons s'effectue grâce à un orifice récupérant l'huile qui se trouve localement en sous pression.

Les paliers d'arbre à came, les poussoirs, les culbuteurs sont également lubrifiés sous pression.

Selon les applications, des injecteurs placés sur la rampe de graissage projettent de l'huile sous les têtes de pistons pour qu'ils soient refroidis.

Les huiles doivent maintenir en suspension les impuretés recueillies pendant le fonctionnement du moteurs, c'est pourquoi il convient d'épurer convenablement l'huile en plaçant un filtre dans le circuit. Voir la figure suivante III.3 qui représente le circuit de la lubrification de moteur PAYUAD-DIESEL

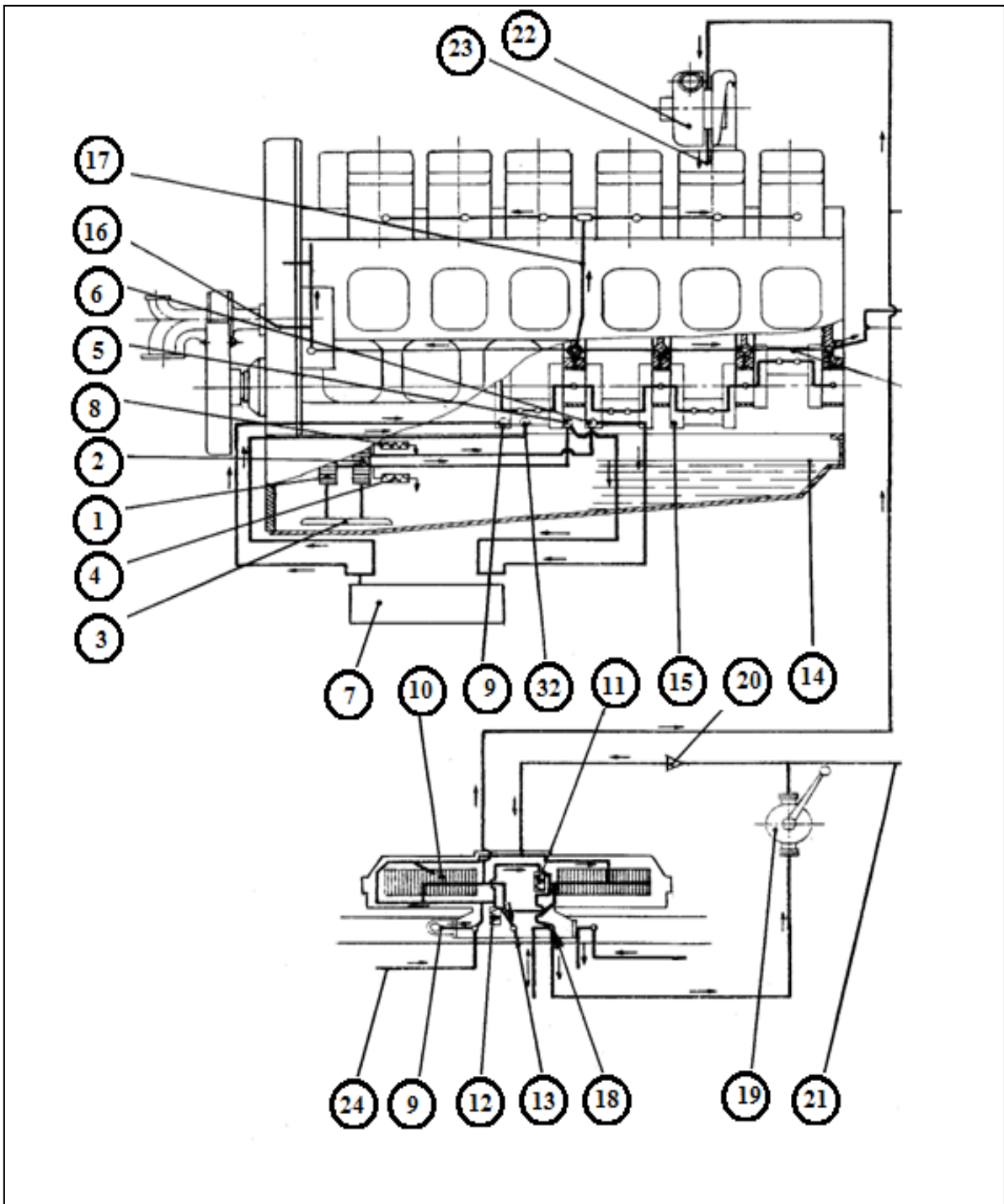


Figure.III.3. Circuit de lubrification de moteur POYAUD DIESEL.

1. Pompe à huile 1
2. Pompe à huile 2

3. Crépine d'huile
4. Clapet de décharge de la pompe 1
5. Refoulement pompe 1 au réfrigérant
6. Refoulement pompe 2 au réfrigérant
7. Réfrigérant d'huile
8. Clapet de décharge de la pompe 2 Réfrigérant d'huile
9. Arrivée d'huile du réfrigérant au filtre Purflux
10. Filtre à huile Purflux
11. Clapet de décharge du filtre Purflux
12. Clapet de colmantage de filtre Purflux
13. Rampe de graissage des paliers
14. Vilebrequin
15. Niveau d'huile dans la cuvette
16. Graissage des pignons et paliers de distribution
17. Graissage de la culbuterie
18. Aspiration pompe Japy et décharge filtre
19. Pompe Japy de vidange et pré-graissage
20. Clapet de retenue
21. Vidange d'huile
22. Turbo Hoslset 4 MD coté gauche
23. Retour d'huile du turbo coté gauche
24. Arrivée d'huile du réfrigérant au filtre Purflux.

III.2.3. Mesure de la viscosité ASTM D445

Cette technique a pour objectif de mesurer le temps d'écoulement d'une quantité de lubrifiant sous gravité à travers un viscosimètre à capillaire en verre calibré.

III.2.3.1. Appareillages

- Viscosimètre à capillaire Cannon-Fenske.
- Bain viscosimétrique.
- Deux chronomètres.

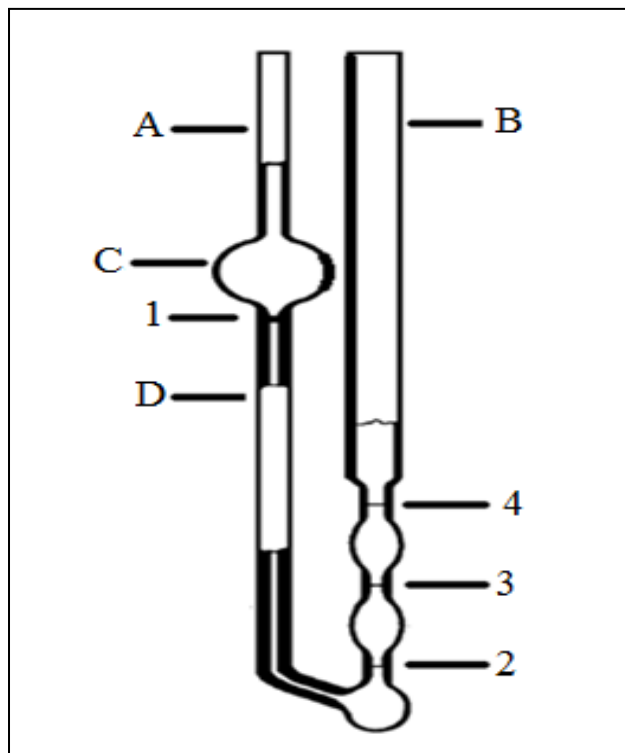


Figure.III.4. Viscosimètre à capillaire Cannon-Fenske



Figure.III.5. Bain viscosimétrique [113]



Figure.III.6. Chronomètre Numérique

III.2.3.2. Mode opératoire

1. Le viscosimètre étant tenu à l'inverse, immerger le tube A dans l'échantillon et aspirer par le tube B l'huile dans le réservoir C jusqu'au trait (1).
2. Retourner le viscosimètre, lorsque le ménisque s'est déplacé dans D et que le réservoir E est à moitié plein, fermer le tube de ventilation B avec un bouchon, puis accrocher le viscosimètre avec son support dans le bain viscosimétrique.
3. Laisser le viscosimètre chargé dans le bain suffisamment longtemps pour que la température d'essai soit atteinte, généralement 40°C.
4. À l'aide d'un chronomètre mesurer le temps de passage du trait (2) jusqu'au trait (3), puis avec un autre chronomètre du trait(3) jusqu'au trait (4), cette opération est enregistrée avec l'œil humain et le temps d'écoulement est mesuré manuellement.
5. Déterminer la viscosité cinématique en utilisant la relation suivante :

$$\mu = (C1 \times t1 + C2 \times t2)/2 \quad (\text{III.1})$$

C1 et C2 : sont des constantes fournies par le constructeur.

t1 et t2 : sont les temps de passage.

Remarque :

La durée d'écoulement doit être inférieure à 200 secondes, sinon choisir un autre capillaire

III.3. Résultat et discussion

Les résultats de l'analyse de viscosité sont présentés dans le tableau III.3:

Tableau.III.3. Résultats d'analyse des échantillons

N°Huile	1	2	3	4	5	6	7	8	9
η (cSt)	87.65	138.6	139.4	139.5	90.5	138.2	103	137.5	83.6

L'analyse d'huile CHELIA SAE 40 neuve donne une valeur de viscosité égale à 143.5 cSt au lieu de 150 cSt (d'après ses caractéristiques), cette différence des deux valeurs (143.5 et 150 cSt) a pour cause :

- Soit de l'imprécision du calcul du viscosimètre
- Soit d'une dégradation de viscosité lors du stockage en l'atelier ou chez le fournisseur.
- Soit l'huile est de mauvaise qualité à partir de sa fabrication.

Remarque :

Un mauvais stockage peut générer principalement trois risques [114] :

- Contamination extérieure (eau, poussières)
- Altération due à un stockage trop prolongé
- Effacement de l'étiquetage et donc risque d'erreur.

Il est préférable de conserver les bidons d'huile moteur en position verticale et [115] :

- hors gel ;
- à des températures inférieures à 50° C ;
- à l'abri de la lumière et de l'humidité.

La durée de stockage des huiles pour moteurs varie selon l'usage que l'on fait du bidon [4].

- Bidon d'huile moteur non ouvert : Le bidon d'huile peut être stocké 3 ans au maximum. Au-delà, les propriétés et les performances de l'huile lors de l'utilisation ne sont généralement plus garanties
- Bidon d'huile moteurs ouvert : un bidon d'huile entamé doit de préférence être terminé au cours de l'année suivant son ouverture.

La fonction de dégradation de viscosité est :

$$\eta = a(t) + b \quad (\text{III.2})$$

$$\text{A } t = 0 \rightarrow \eta = 143.5 \Rightarrow b = 143.5$$

La fonction de dégradation devient :

$$\eta = a(t) + 143.5 \quad (\text{III.3})$$

A partir du tableau V.1, on peut déduire la fonction de dégradation de viscosité de chaque huile moteur étudiée. Les fonction qui représente la dégradation de la viscosité des huiles moteurs étudiées sont les suivantes :

$$\eta_1 = -1.117t + 143.5 \quad (\text{III.4})$$

$$\eta_2 = -0.098t + 143.5 \quad (\text{III.5})$$

$$\eta_3 = -0.082t + 143.5 \quad (\text{III.6})$$

$$\eta_4 = -0.08t + 143.5 \quad (\text{III.7})$$

$$\eta_5 = -1.06t + 143.5 \quad (\text{III.8})$$

$$\eta_6 = -0.106t + 143.5 \quad (\text{III.9})$$

$$\eta_7 = -0.81t + 143.5 \quad (\text{III.10})$$

$$\eta_8 = -0.12t + 143.5 \quad (\text{III.11})$$

$$\eta_9 = -1.19t + 143.5 \quad (\text{III.12})$$

En représentant ces équations sur la figure III.7

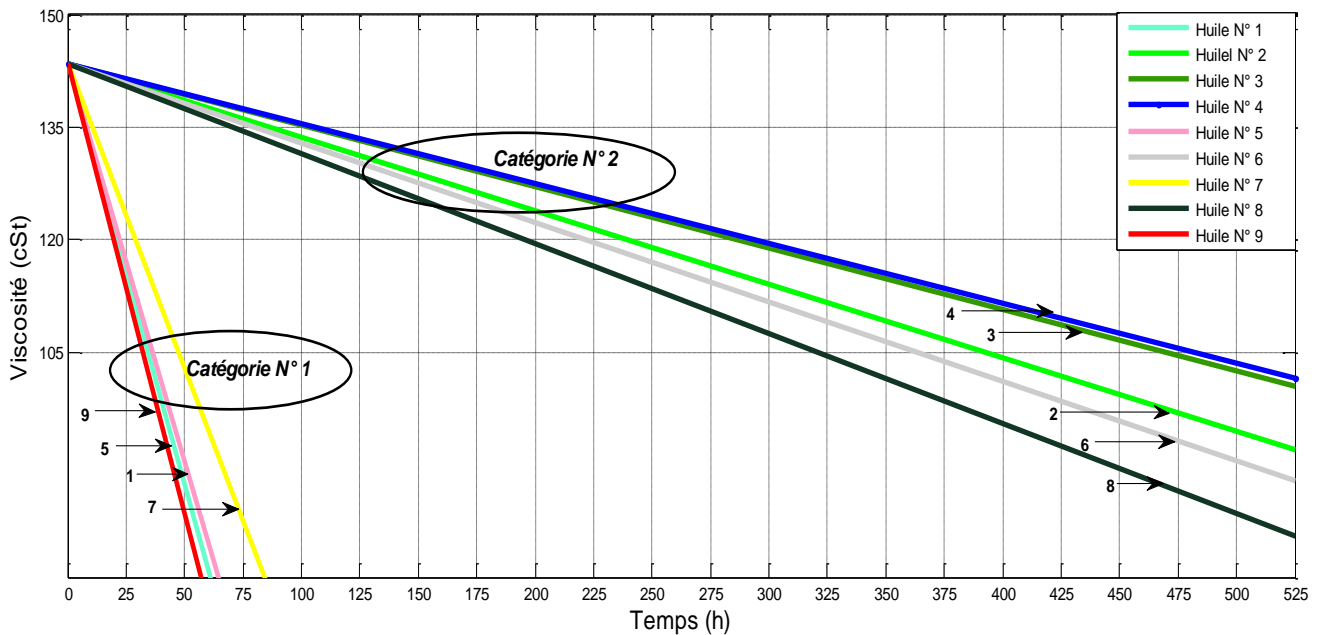


Figure.III.7. Variation de la viscosité d'huile en fonction du temps de service

D'après la figure III.7, on remarque que les graphes de cette figure sont regroupés en (02) deux catégories :

- La 1^{ère} catégorie correspond aux les huiles N° 1, 7, 9, 5.
- La 2^{ème} catégorie correspond aux les huiles N° 2, 3, 4, 6, 8.

La viscosité minimale admissible pour assumer une bonne lubrification est de l'ordre de 105 cSt, Selon les normes (20÷30)% inférieur à la viscosité du l'huile neuve.

Pour la 1^{ère} catégorie, on remarque que la viscosité a diminué rapidement pendant un temps de fonctionnement ne dépasse pas 150 heures, ce qui nous oblige de faire le changement de l'huile de ces moteurs après une durée de fonctionnement très courte (20 heures au moins), car le graissage avec une huile très fluide pouvant avoir quelques

inconvenients, tels que ; l'usure des pistons au titre d'exemple.

La diminution de la viscosité des moteurs de la 1^{ère} catégorie exprime l'inefficacité du système de refroidissement de ces moteurs (refroidissement suffisant), la température de l'huile va augmenter, sachant qu'une telle température influe directement sur la viscosité, (elles sont en relation inverse, lorsque la température augmente la viscosité diminue).

L'augmentation de température d'huile à cause d'un mauvais refroidissement, s'il y a un refroidissement insuffisant, l'huile s'échauffe et atteint un point de fatigue d'où elle va perdre sa viscosité peu à peu.

Sachant qu'un mauvais refroidissement a pour cause de [67] :

- Débit d'eau de refroidissement insuffisant ou la température de l'eau trop élevée.
- Mauvaise fonctionnement de la soupape thermostatique.
- Encrassement du réfrigérant coté eau et/ou huiles.
- Circuit de refroidissement d'eau défectueux
- Pompe à eau défectueuse.
- Soupape thermostatique défectueuse

Remarque :

Un autre facteur influe directement sur la qualité de l'huile (viscosité), ce facteur est le mélange, dont trois genres de mélange peuvent être constatés :

- Mélange gaz-oil/huile : se passe souvent, soit à cause d'un orifice d'injection défectueuse, ce qui provoque l'absence de la pulvérisation de gaz-oil injecté dans la chambre de combustion, donc le carburant qui sera injecté sous forme de gouttes se mêle avec l'huile de graissage des pistons et petite à petite le gaz-oil pénètre dans le circuit de graissage. Ou à cause de la détérioration du joint torique de la pompe hydraulique, et dans ce cas l'huile va être mélangée rapidement par la circulation du gaz-oil dans le circuit de retour.
- Mélange eau/huile : ou l'eau de refroidissement pénètre dans le circuit de l'huile à cause d'une défectuosité de tuyauterie de refroidissement passant dans le carter d'huile.
- Mélange huile/eau : dans lequel l'huile pénètre dans le circuit de l'eau, il n'a néanmoins des effets estimable sur le graissage sauf la diminution du niveau du

carter.

Pour la 2^{ème} catégorie, on remarque que la viscosité de ces huiles moteurs pendant une durée de fonctionnement de 250 heures qu'elle est supérieure à la viscosité admissible minimale, ce qui montre que les moteurs cette catégorie sont en fonctionnement normale, cela nous a permet de déterminer la durée optimale pour que l'huile devra être renouvelée ou changée.

De ce fait, la dégradation de la viscosité moyenne de la 2^{ème} catégorie est décrite par la relation suivante :

$$\eta = -0.097t + 143.5 \quad (\text{III.13})$$

Cette fonction est représentée sur la Figure III.8

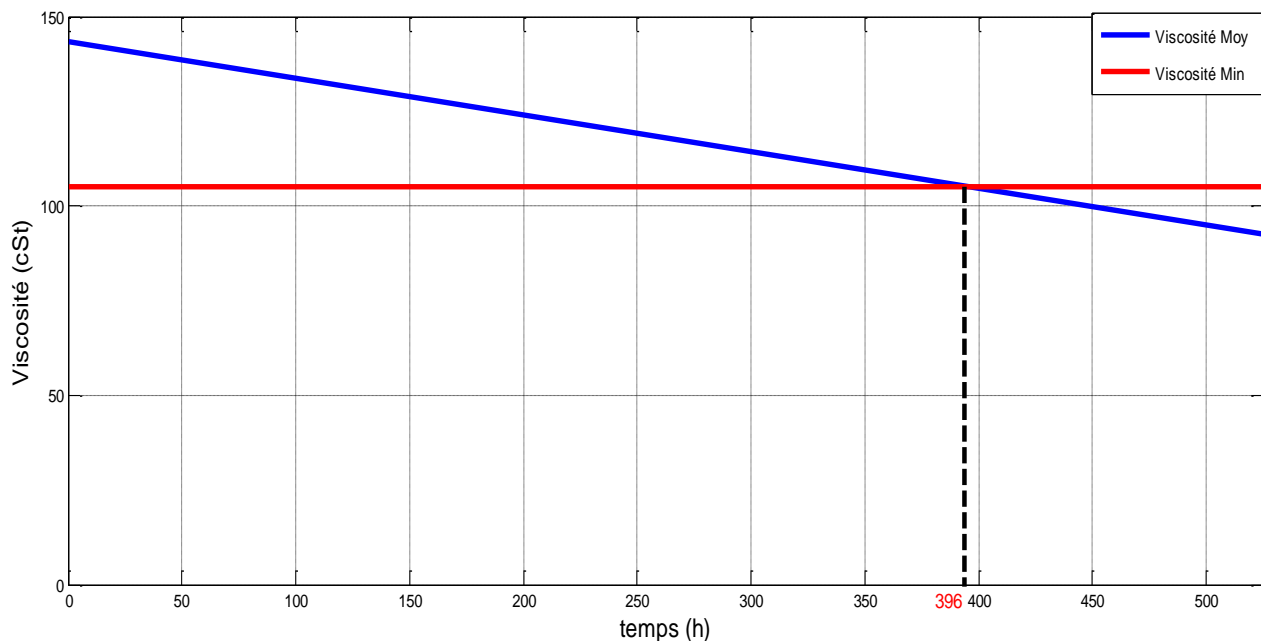


Figure.III.8. Courbe moyenne de la variation de la viscosité pour les huiles moteurs de la 2^{ème} catégorie

D'après la figure III.8, on voit que le temps de fonctionnement optimal, ou bien le temps de vidange optimal des huiles moteurs de la deuxième catégorie est de l'ordre de 396 heures à la moyenne.

Donc pour que le lubrifiant accomplis son rôle, il faut le renouveler chaque 396 heures de service et il ne faut pas dépasser ce délai afin de ne pas endommager les différentes pièces du moteur ; il ne faut pas aussi vidanger le moteurs avant ce délai pour économiser de l'huile au

maximum.

III.4. Conclusion

L'état de dégradation d'un lubrifiant est déterminé par les variations de sa viscosité car elle est le paramètre majeur qui caractérise l'huile. Si la valeur de la viscosité dépasse un certain seuil l'huile doit être renouveler ou bien changer.

Dans ce chapitre nous avons optimisée une durée de fonctionnement pour laquelle l'huile CHILIA SAE 40 utilisée pour la lubrification des moteurs POYAUD DIESEL, atteint le délai de vidange ; suite à la dégradation de sa viscosité et tenant compte des conditions de travail. Nous avons déterminé cette durée à 396 heures au moyen ; tant que le moteur est en bon état (bon refroidissement et bonne étanchéité).

Chapitre IV : Modélisation de la dégradation de la viscosité des huiles moteurs

IV.1. Introduction.....	69
IV.2. Méthodologie du travail.....	69
IV.3. Résultats et discussion.....	72
IV.4. Conclusion.....	81

IV.1.Introduction

L'approche Markovienne est la plus couramment utilisée pour le traitement probabiliste des systèmes dynamiques. Une chaîne de Markov à valeurs dans un espace fini E est un processus stochastique à temps discret qui vérifie la propriété de Markov. Cette propriété suppose que l'estimation de l'état du futur dépende seulement du présent indépendamment du passé.

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthodologie à suivre pour modéliser la dégradation de la viscosité des huiles utilisées pour la lubrification des moteurs à combustion en utilisant les chaînes de Markov.

IV.2. Méthodologie du travail

Cette étude a pour but de suivre le processus de dégradation des huiles lubrifiantes, et permet d'évaluer la durée de fonctionnement limite ainsi que l'évolution du changement de son état dans le temps.

Les chaînes de Markov permettent de prédire la dégradation de la viscosité d'une huile après une durée de fonctionnement déterminée. Par les quelles cette dégradation peut être décrite par des probabilités de transition d'un état à un autre. Sachant que les modèles Markoviens à leurs tours sont utilisés pour décrire la probabilité de transition à un nouvel état (i) à l'instant (t+1) en se basant directement sur la probabilité de l'état précédent (j) à l'instant (t).

Pendant la durée de vie de l'huile moteur utilisée, la dégradation de la viscosité passée par plusieurs états A, B, C, D sont respectivement bonne, admissible, dégradée, très dégradée.

- A: viscosité bonne : $\eta \geq 135$ (10% inférieur à la viscosité du l'huile fraiche).
- B: viscosité admissible: $135 > \eta \geq 120$ (20% inférieur à la viscosité du l'huile fraiche).
- C: viscosité dégradée: $120 > \eta \geq 105$ (30% inférieur à la viscosité du l'huile fraiche).
- D: viscosité très dégradée: $\eta < 105$ (30% inférieur à la viscosité du l'huile fraiche).

Au delà nous proposons d'associer une chaîne de Markov décrivant la transition de la viscosité d'un état (i) à un autre état (j) pour chaque huiles étudiées

Les probabilités de transition possibles sont :

- P_{aa} c'est la probabilité de la viscosité de rester à l'état bonne.
- P_{ab} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état bonne à l'état admissible.
- P_{ac} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état bonne à l'état dégradée.
- P_{ad} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état bonne à l'état très dégradée.
- P_{ba} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état admissible à l'état bonne.
- P_{bb} c'est la probabilité de la viscosité de rester à l'état admissible.
- P_{bc} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état admissible à l'état dégradée.
- P_{bd} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état admissible à l'état très dégradée.
- P_{ca} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état dégradée à l'état bonne.
- P_{cb} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état dégradée à l'état admissible.
- P_{cc} c'est la probabilité de la viscosité de rester à l'état dégradée.
- P_{cd} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état dégradée à l'état très dégradée.
- P_{da} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état très dégradée à l'état bonne.
- P_{db} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état très dégradés à l'état admissible.
- P_{dc} c'est la probabilité de transition de la viscosité de l'état très dégradée à l'état dégradée.
- P_{dd} c'est la probabilité de la viscosité de rester à l'état très dégradée.

Les probabilités de transition sont estimées par le calcul des fréquences d'observation de chaque transition ce qui correspond à l'estimateur du maximum de vraisemblance qui sera présenté plus loin.

Les probabilités de transition sont regroupées dans une matrice M appelée matrice de transition. Pour deux états $i, j \in E$, P_{ij} est la probabilité de passer de l'état i à l'état j . La matrice M est dite markovienne ou stochastique et est caractérisée par les propriétés suivantes :

- $\forall i, j \in E, P_{ij} \geq 0$;

- $\forall i \in E, \sum_{j \in i} P_{ij} = 1.$

La matrice de transition qui représente notre modèle est (quatre états) :

$$M = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} & P_{ad} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} & P_{bd} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} & P_{cd} \\ P_{da} & P_{db} & P_{dc} & P_{dd} \end{bmatrix}$$

On note :

- La probabilité d'aller de l'état i à l'état j , $P(X_n = j | X_{n-1} = i)$ est notée P_{ij} .
- La probabilité d'aller de l'état i à l'état j en n pas, est notée P_{ij}^n .

Pour visualiser le changement de l'état de la viscosité des huiles moteurs, il est souvent utile de représenter la matrice de transition M par un graphe représentatif.

Le modèle graphique qui représente les probabilités de transition de la viscosité des huiles étudiées est montré dans la figure.

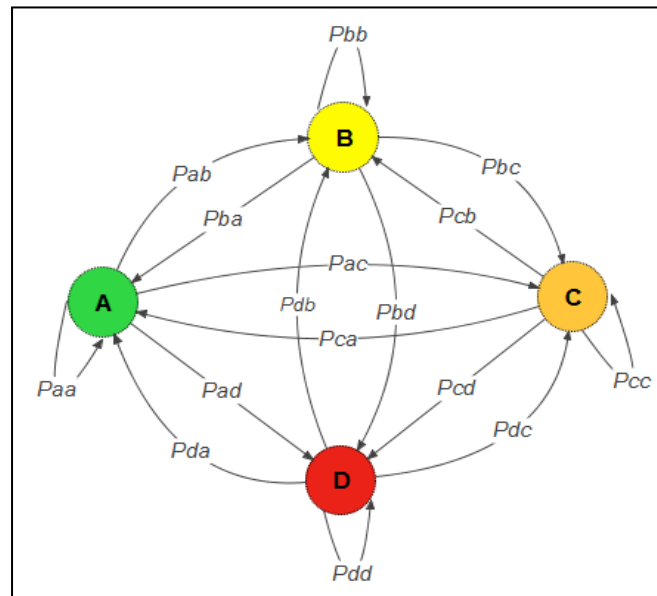


Figure. IV.1. Le modèle graphique

Nous supposons qu'il n'y a que de transitions en avant et pas de transitions en arrière c'est à dire La viscosité de l'huile ne jamais transmettre d'un état dégradée à l'état bonne alors :

$$P_{ba} = P_{ca} = P_{cb} = P_{da} = P_{db} = P_{dc} = 0$$

La matrice de transition M devient :

$$M = \begin{bmatrix} Paa & Pab & Pac & Pad \\ 0 & Pbb & Pbc & Pbd \\ 0 & 0 & Pcc & Pcd \\ 0 & 0 & 0 & Pdd \end{bmatrix}$$

D'après le modèle Markovien les probabilités du changement d'état de la viscosité à l'étape n est présenté sous la forme:

$$p_{(n)} = p_{(n-1)}M$$

- $p_{(n)}$: C'est la matrice ligne qui donne les probabilités des différents états de la viscosité à la classe d'âge (n).
- $p_{(n-1)}$: Représente la matrice ligne des probabilités correspondantes aux différents états de la viscosité pour la classe d'âge ($n-1$).
- M : C'est la matrice de transition de Markov.

Ou

$$p_{(n)} = p_{(0)}M^n$$

- $p_{(0)}$: C'est la matrice lignes qui donne les probabilités initiales (l'état de départ)

IV.3. Résultat et discussion

D'après la figure III.4, on peut déduire les données illustrées dans le tableau. IV.1.

Tableau. IV.1. Changement d'état de la viscosité des huiles étudiées

Temps (h)	Nombre des huiles				
	Viscosité bonne	Viscosité admissible	Viscosité dégradée	Viscosité très dégradée	Viscosité très dégradée cumulée
0	9	0	0	0	0
25	5	1	3	0	0
50	5	0	0	4	4
75	4	1	0	0	4
100	2	3	0	0	4
125	0	5	0	0	4
150	0	5	0	0	4
175	0	5	0	0	4
200	0	4	1	0	4
225	0	3	2	0	4
250	0	2	3	0	4
275	0	2	3	0	4
300	0	0	5	0	4
325	0	0	4	1	5
350	0	0	4	0	5
375	0	0	3	1	6
400	0	0	2	1	7
425	0	0	2	0	7
450	0	0	2	0	7
475	0	0	1	1	8
500	0	0	0	1	9

A partir de tableau IV.1 on peut calculer les probabilités de transition pour chaque changement d'état comme montre la figure IV.2

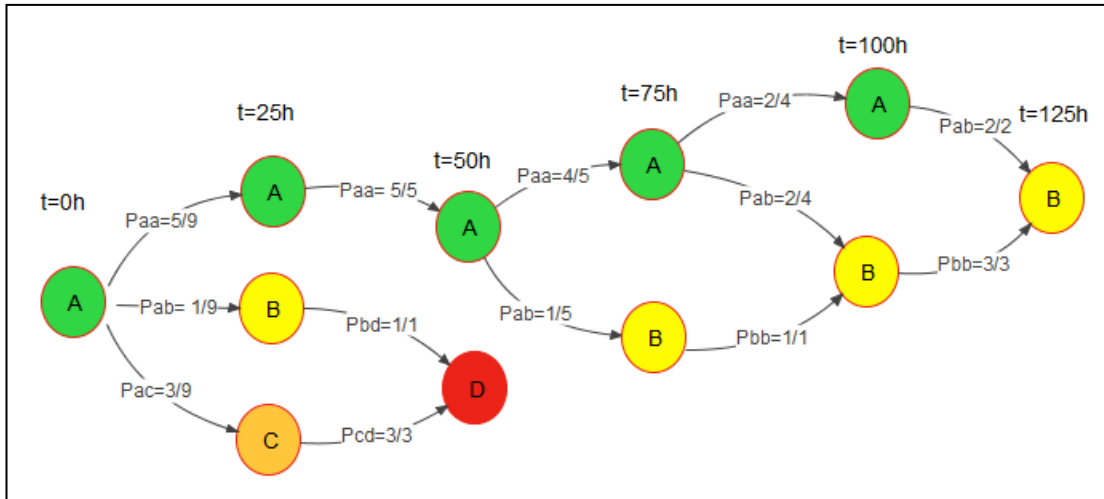


Figure.IV.2. Représentation graphique de changement d'état de la viscosité des huiles étudiées pendant 125h de service

Donc, on obtient la matrice de transition suivante :

$$M = \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Après une durée de service (représentée par une classe d'âge bien définie (n), notre modèle sera donner par:

$$P_{(n)} = P_{(0)}M^n$$

$$P_{(0)} = [1000]$$

$$P_{(n)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^n$$

Pour prédire l'état de la viscosité après une classe d'âge (25h de fonctionnement) :

$$p_{(1)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^1 = [0.57 \ 0.361 \ 0.069 \ 0]$$

Après la première mesure, il y a 57% de chances que la viscosité soit encore en bon état, 3.61% à l'état admissible, 0.69% à l'état dégradée et 0% de chance que la viscosité est très dégradée.

Pour la deuxième classe d'âge :

$$p_{(2)} = p_{(0)} M^2$$

$$p_{(2)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^2 = [0.325 \ 0.466 \ 0.155 \ 0.05]$$

Après la deuxième mesure, il y a 32,5% de chances que la viscosité soit encore en bon état, 46,6% à l'état admissible, 15,5% à l'état dégradée et 0,5% à fort degré de dégradation.

$$p_{(3)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^3 = [0.185 \ 0.454 \ 0.221 \ 0.139]$$

$$p_{(4)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^4 = [0.105 \ 0.394 \ 0.258 \ 0.241]$$

$$p_{(5)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^5 = [0.06 \ 0.323 \ 0.27 \ 0.346]$$

$$p_{(6)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^6 = [0.034 \ 0.254 \ 0.263 \ 0.447]$$

$$p_{(7)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^7 = [0.019 \ 0.196 \ 0.244 \ 0.539]$$

$$p_{(8)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^8 = [0.011 \ 0.148 \ 0.218 \ 0.621]$$

$$p_{(9)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^9 = [0.006 \ 0.111 \ 0.190 \ 0.691]$$

$$p_{(10)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{10} = [0.003 \ 0.082 \ 0.1622 \ 0.751]$$

$$p_{(11)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{11} = [0.002 \ 0.061 \ 0.136 \ 0.80]$$

$$p_{(12)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{12} = [0.001 \ 0.044 \ 0.112 \ 0.841]$$

$$p_{(13)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{13} = [0.000 \ 0.032 \ 0.091 \ 0.874]$$

$$p_{(14)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{14} = [0.000 \ 0.023 \ 0.074 \ 0.901]$$

$$p_{(15)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{15} = [0.000 \ 0.017 \ 0.059 \ 0.922]$$

$$p_{(16)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{16} = [0.000 \ 0.012 \ 0.047 \ 0.939]$$

$$p_{(17)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{17} = [0.000 \ 0.009 \ 0.037 \ 0.952]$$

$$p_{(18)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{18} = [0.000 \ 0.006 \ 0.029 \ 0.963]$$

$$p_{(19)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{19} = [0.000 \ 0.004 \ 0.023 \ 0.971]$$

Pour la dernière mesure de viscosité qui correspond à la 20^{ième} classe d'âge (500 h), on obtient:

$$p_{(20)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.361 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0.722 & 0.178 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.746 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{20} = [0.00 \ 0.00 \ 0.01 \ 0.98]$$

Ces puissances convergent rapidement vers une matrice ligne fixe, cela signifie qu'après avoir calculé la 20ième puissance, la matrice ne change pratiquement plus.

D'après ce modèle les probabilités de changement d'états de la viscosité des huiles étudiées en fonction du temps de service sont représentées dans la figure 6

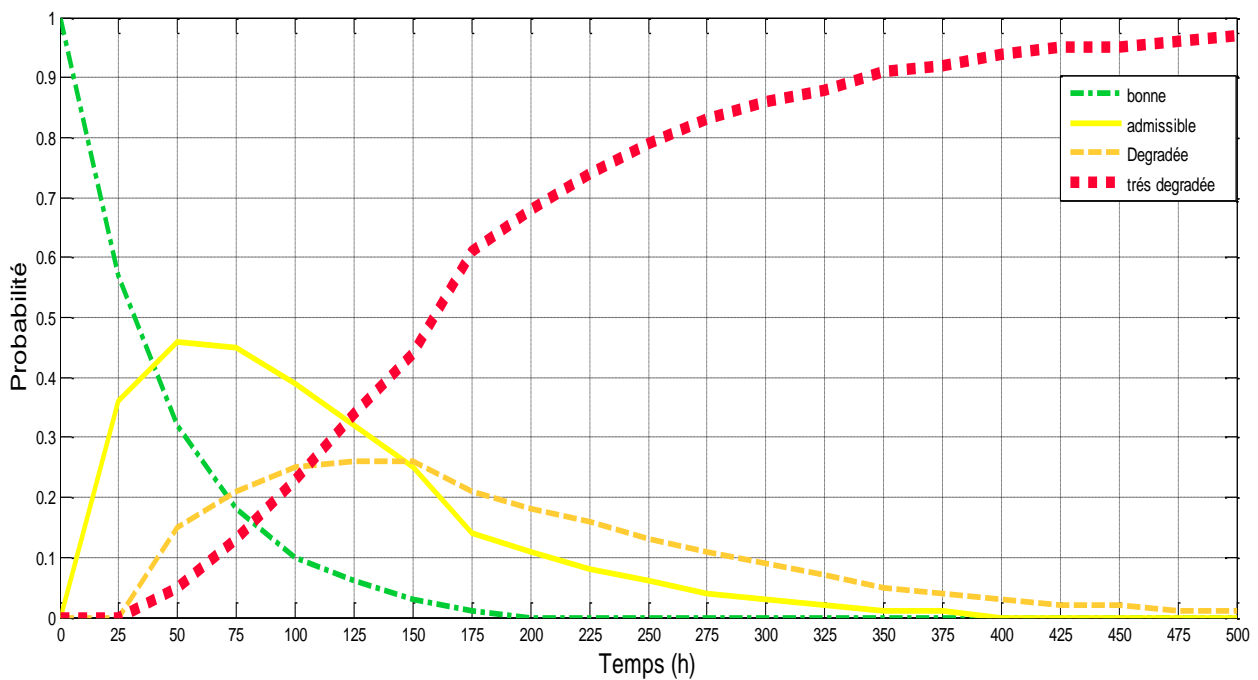


Figure. IV.3. Probabilité du différent état de viscosité d'après le modèle proposé

D'après la figure IV.3 nous constaté que le modèle proposé apporte une bonne estimation de la probabilité du changement d'état de la viscosité, et une bonne prédiction.

Tableau. IV.2. La probabilité calculée de l'état bon et très dégradée

Temps (h)	Probabilité calculée		Probabilité d'après le modèle	
	Bonne	Très dégradée	Bonne	Très dégradée
0	0	0	1	0
25	0.55	0	0.57	0
50	0.55	0.44	0.325	0.05
75	0.44	0.44	0.185	0.139
100	0.22	0.44	0.105	0.241
125	0	0.44	0.06	0.346
150	0	0.44	0.034	0.447
175	0	0.44	0.019	0.539
200	0	0.44	0.011	0.621
225	0	0.44	0.006	0.691
250	0	0.44	0.003	0.751
275	0	0.44	0.002	0.80
300	0	0.44	0.001	0.841
325	0	0.55	0	0.874
350	0	0.55	0	0.901
375	0	0.66	0	0.922
400	0	0.77	0	0.939
425	0	0.77	0	0.952
450	0	0.77	0	0.963
475	0	0.88	0	0.971
500	0	0.99	0	0.978
525	0	0.99	0	0.999

On représente les valeurs de tableau IV.2 dans les figures IV.4 et IV.5 respectivement.

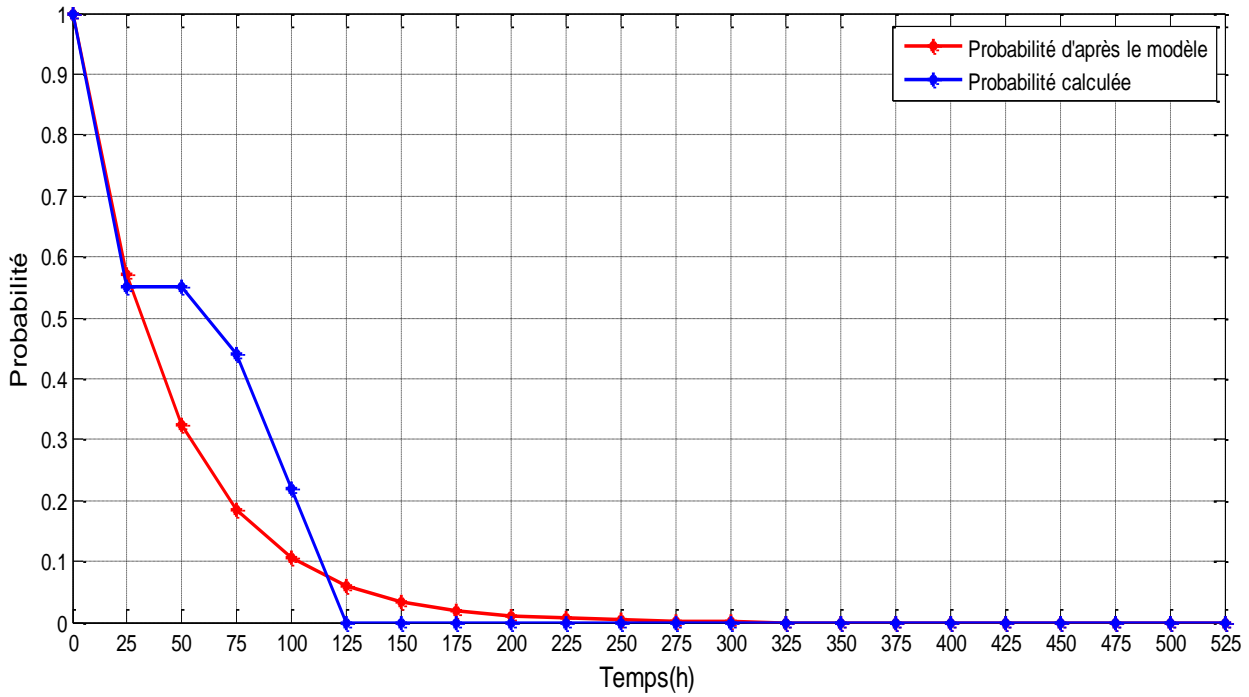


Figure. IV.4. Les probabilités selon le modèle et les probabilités calculées avec la méthode classique “viscosité bonne”

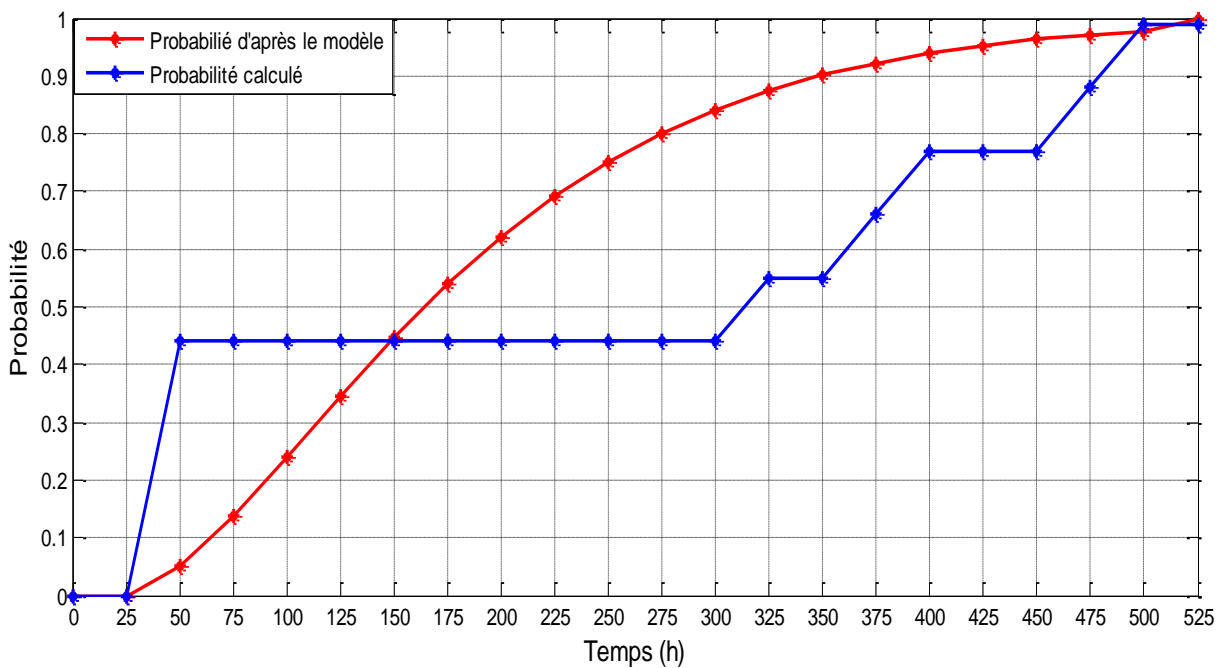


Figure. IV.5. Les probabilités selon le modèle et les probabilités calculées avec la méthode classique “viscosité très dégradée”

D’après les figures IV.4, IV.5 on remarque que les probabilités calculées par le modèle Markovien et les probabilités calculées par la méthode classique sont très proche, en se basant

aussi sur les valeurs du coefficient de corrélation pour les fonctions représentatives de 'viscosité bonne' et celui 'viscosité très dégradée' et qui sont respectivement ($r = 0.96, 0.76$), on peut confirmer que les deux fonctions sont très corrélées.

Dans cette étude nous avons considéré une huile lubrifiante de type (SAE40), le suivi de son état permet la préparation pour programmer l'opération de changement de celui-ci au moment nécessaire afin d'améliorer la fiabilité de moteur. Notre modèle fournit donc l'information que l'on cherche à savoir sur l'état réel de l'huile lubrifiante.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les chaînes de Markov qui permettent de prédire la dégradation de la viscosité d'une huile après une durée de fonctionnement déterminée. Par lesquelles cette dégradation peut être décrite par des probabilités de transition d'un état à un autre, sachant que les modèles Markoviens à leurs tours sont utilisés pour décrire la probabilité de transition à un nouvel état (i) à l'instant (t+1) en se basant directement sur la probabilité de l'état précédent (j) à l'instant (t).

Donc, les chaînes de Markov ont donné avec précision les probabilités du changement de la qualité de l'huile lubrifiante des moteurs à combustion, ce qui nous a permis une bonne estimation de l'état de sa viscosité et en conséquence fournit une bonne prédiction de la durée de vie restante.

Conclusion générale

Conclusion générale

La lubrification en générale est une opération importante pour la préservation de l'état des pièces en mouvement surtout les moteurs à combustion se sont des machines dont la lubrification des différents organes doit être contrôlé quotidiennement.

Nous avons proposé une étude pour la caractérisation de la dégradation de la viscosité d'une huile utilisée pour la lubrification des moteurs d'entraînement des locotracteurs exploités dans les conditions de complexe sidérurgique El Hadjar en Algérie.

La première partie de notre travail a permis de bien comprendre le rôle des lubrifiants et leurs propriétés physico-chimiques dont la viscosité est la plus importante, ainsi que les différents types de dégradation de l'huile lubrifiante et les différents régimes de lubrification d'un moteur à combustion interne plus spécialement le moteur diesel. Cette étude bibliographique nous a permis de souligner l'importance de la lubrification dans le fonctionnement des moteurs car elle permet d'augmenter le rendement et la durée de vie de ces derniers.

D'autre part, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'étude des processus stochastiques qui permettent une meilleure modélisation des phénomènes aléatoires qui évoluent dans le temps. Nous avons présenté quelques processus stochastiques et les chaînes de Markov en particulier, avec une explication détaillée de leurs éléments essentiels (matrice et probabilité de transition), leurs types, et les concepts de base de la théorie des chaînes de Markov qui seront utiles dans notre travail.

En plus, nous avons fait une étude expérimentale sur la dégradation de la viscosité de l'huile CHILIA SAE 40 qui est utilisée pour la lubrification des moteurs des locotracteurs dans des conductions de complexe sidérurgique, afin de déterminer le temps de fonctionnement optimal de cette huile.

Par la suite nous avons présenté la méthodologie à suivre pour modéliser la dégradation de la viscosité des huiles utilisées pour la lubrification des moteurs à combustion en utilisant les chaînes. Nous avons déterminé les chaînes de Markov qui permettent de prédire la dégradation de la viscosité d'une huile après une durée de fonctionnement déterminée, par lesquelles cette dégradation peut être décrite par des probabilités de transition d'un état à un autre, sachant que les modèles Markoviens à leurs tours sont utilisés pour décrire la probabilité de transition

à un nouvel état (i) à l'instant (t+1) en se basant directement sur la probabilité de l'état précédent (j) à l'instant (t).

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- La viscosité du lubrifiant joue un rôle important pour la prolongation de la durée de vie du moteur et l'amélioration des performances des moteurs à combustion, ce qui nécessite une surveillance régulière de ce paramètre.
- Une lubrification de qualité, c'est de maintenir la viscosité du lubrifiant utilisé à un niveau acceptable d'un côté et une quantité suffisante d'autre côté.
- Le modèle de Markov proposée dans cette étude décrit avec précision les probabilités du changement de la qualité de l'huile lubrifiante des moteurs à combustion, ce qui nous permis une bonne estimation de l'état de sa viscosité et en conséquence elle fournit une bonne prédiction de la durée de vie restante.
- Le temps optimal pour changer l'huile moteur est de l'ordre de 396 heures au moyen ; tant que le moteur est en bon état (bon refroidissement et bonne étanchéité).
- Les probabilités calculées par le modèle Markovien et les probabilités calculées par la méthode classique sont très proche, en se basant aussi sur les valeurs du coefficient de corrélation pour les fonctions représentatives de viscosité bonne et celui viscosité très dégradée et qui sont respectivement ($r = 0.96, 0.76$), on peut confirmer que les deux fonctions sont très corrélées.

Dans des futurs travaux, on prévoit de généraliser l'application de ce genre du modèle pour modéliser l'évolution d'autre grandeurs physique tell que ; la vibration, l'usure d'un tel system industrielle.

Références bibliographique

Références bibliographiques

- [1] F. Ștefănoiu, Synthèse et caractérisation d'asas anhydridesalkenyles succiniques et de dérivés d'asas application à l'industrie des lubrifiants, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, (2007).
- [2] M. A. Chemrak, Cours production des huiles de base, Centre universitaire de Tissemsilt, (2017). https://www.academia.edu/36391741/Cours_Raffinage_des_Huiles_de_Base
- [3] J. Denis, J. Briant, J-C. Hipeaux, Physico-Chimie des lubrifiants: Analyses et essais, Publications de l'institut français du pétrole, Technip, (1997).
- [4] N. Benchouia, La maintenance productive, Concepts et outils, Support de cours, (2015).
- [5] F. Bernard, Formulation des huiles moteur partie 1, Cours moteurs ENSPM, (2005).
- [6] P. Duchesne, Physico-chimie et constitution des huiles lubrifiantes, ENSPM, (2006).
- [7] J. Ayel, Lubrifiants: Additifs à action chimique, Techniques de l'ingénieur, B5343, (2001).
- [8] J. Ayel, Lubrifiants: Additifs à action physique ou physiologique, Techniques de l'ingénieur, B5344, (2002).
- [9] H. Rayn, Use of group II, group III base stocks in hydraulic and industrial applications, The 5th Annual Fuels and Lubes Asia Conference Manila, (1999).
- [10] C. A. Migdal, The Effect of Antioxidants on the Stability of Base Oils, The 5th Annual Fuels and Lubes Asia Conference Manila, (1999).
- [11] V. J. Gatto, M. A. Grina, Effects of Base Oil Type, Oxidation Test Conditions and Phenolic Antioxidant Structure on the Detection and Magnitude of Hindered Phenol/Diphenylamine synergism, Lubrication Engineering, (1999) 11-20.
- [12] Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, Lubrifiant et produits connexes pour l'automobile : Direction des affaires juridiques, (2000).
- [13] M. Born, J. Ayel, Lubrifications et fluides pour l'automobile, Technip, Paris, (1998).
- [14] J. H. Raddatz, Detergent-Dispersant Additive, ihre Herstellung, Anwendung und wirkungsweise. Additive für Schmierstoffe, (1994) 163-196.
- [15] N. J. H. Small, Dispersants, Katalysatoren, Tenside und Mineralöladditive, Georg Thieme Verlag, (1978).
- [16] E. S. Forbes, Antiwear an Extreme Pressure Additive for Lubricants, Tribology, 3 (1970) 145-152.

- [17] C. G. A. Von Eberan-Eberhorst, R. S. Hexter, A. C. Clark, B. O'Connor, R. H. Walsh, *Aschegebende Extreme-Pressureund, Verschleißschutz-Additive, Additive für Schmierstoffe*, (1994) 53-83.
- [18] Castrol ABC du graissage structure, Utilisation et propriétés des lubrifiants, Switzerland, (2006).
- [19] W. J. Bartz, *Additive für Schmierstoffe*. Vincent Verlag, Hannover, (1986).
- [20] H. Pennewiß, J. Omeis, *ACS Polymer. Preprints*, 35 (1994).
- [21] H. Hellberg. *Schaumdämpfer, Farbstoffe and Geruchsüberdecker. Katalysatoren, Tenside und Mineralöladditive*, Georg Thieme Verlag, (1978).
- [22] C. Jérémy, *Les huiles hydrauliques, fluides & transmissions, le coin formation d'In Situ*, (2009) 37-38.
- [23] V. V. Karanović, M. T. Jocanović, J. M. Wakiru and M. D. Orošnjak, *Benefits of lubricant oil analysis for maintenance decision support*, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 393 (2018).
- [24] J. T. Farinha, I. Fonseca and L. A. Ferreira, *Condition monitoring with prediction based on diesel engine oil analysis: A case study for urban buses hugo raposo*, *Actuators*, 8 (2019) 1-14.
- [25] S. Gowtham, P. K. Rajesh, *Condition monitoring of I.C engines by using oil analysis*, *international journal for innovative research in science & technology*, 22 (2016) 370-375.
- [26] L. V. Markova, V. M. Makarenko, H. Kong, H. G. Han, *Influence of viscosity modifiers on the rheological properties of synthetic oils*, *Journal of Friction and Wear*, 35 (2014) 351–358.
- [27] B. Fitch, *Engine oil analysis best practices*, *Machinery lubrication magazine*, 10 (2016).
- [28] D. Bonneau, A. Fatu, D. Souchet, *Paliers hydrodynamique1: équations, modèles numériques isothermes et lubrification mixte*, Lavoisier, (2011).
- [29] Kumbár Vojtěch, Sabaliauskas Artūras, *Low-temperature behaviour of the engine oil*, *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensi*, LXI (2013) 1763–1767.
- [30] J. L. E. Groff, *ABC du graissage*, Edition Technip, (1961).
- [31] C. J. Seeton, *Viscosity temperature correlation for liquids*, *Tribology Letters* 22 (2006) 67-78.
- [32] N. McCoull, C. Walther, *Viscosity temperature chart*, Lubrication, (1921).
- [33] J. L. Ligier, *Lubrification des paliers de moteurs*, Editions Technip, Paris, (1997).

- [34]C. Barus, Isothermals: isopiestic and isometric relative to viscosity, American Journal of Science, 45 (1893) 87-96.
- [35]Cameron, Basic Lubrication Theory, 1st edn, Ellis Horwood Limited, (1981).
- [36]Louis Martin, Transmissions hydrostatiques Assemblage et conception de circuits, Techniques de l'ingénieur, BM6050 (2000).
- [37]J. Molimard, Etude expérimentale du régime de lubrification en film mince-application aux fluides de laminage. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (1999).
- [38]E. W. Dean, G. H. B. Davis, Viscosity variations of oils with temperature, chemical metallurgical engineering, 36 (1929) 618-619.
- [39]Khalid Nejjar, Etude de la Réactivité Thermique d'une Huile de Lubrification des Moteurs Diesel, Thèse de doctorat, Université Mohammed V de Rabat, (2011).
- [40]A. Jones, Lubricating Oil through the Process of Refining Used Motor Oil, (2010). www.articlealley.com/article.
- [41]S A E Handbook Volume 3, Engines Fuel and Lubricants, (1983).
- [42]M. D. Johnson, S. Korcek, M. Zinbo, M, Inhibition of oxidation by ZDTP and ashless antioxidants in the presence of hydroperoxides at 160 °C, Part I. SAE 831684, (1984).
- [43]André Ernesto, Lubrification colloïdale de contacts dlc : du régime stationnaire au régime transitoire application à la zone segments-piston-chemise, Thèse de doctorat, Université de Lyon délivrée par l'École Centrale de Lyon, (2014).
- [44]M. D. Johnson, S. Korcek, Effects of Nox on liquid phase oxidation and inhibition at elevated temperatures, Lubrication Science, (1991) 95-116.
- [45]E. Fellahi, Biodégradation et gestion des huiles de coupes usées, Thèse de Doctorat, Université de QUEBEC, (1998).
- [46]C. Meunier, Vieillessement des lubrifiants et compréhension des mécanismes de lubrification-Application à la zone Segment-Piston-Chemise, Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, (2008).
- [47]L. Giraud, Modèle prédictif pour le développement d'un système embarqué de vidange des lubrifiants pour transmission, Thèse de Doctorat, Université de QUEBEC, (2000).
- [48]Emmanuelle Querlioz, Etude de la durée de vie des contacts sous-alimentés en lubrifiant, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2007).
- [49]R. Stribeck, Die Wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager, Zeitschrift des Vereins deut- scher Ingenieure, 46 (1902) 1341- 1348.

- [50] J. Frêne, Régimes d'écoulement non laminaire en films minces-Application aux paliers lisses, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, (1974).
- [51] C.M. Taylor, Automobile engine tribology-design considerations for efficiency and durability, *Wear*, 22 (1998) 1-8.
- [52] Bernard Georges, Cours de thermodynamique appliquée, Département Aérospatiale et mécanique, Université de Liège, (2006).
- [53] P. Arquès, Conception et construction des moteurs alternatifs: de la théorie à la compétition, Ellipses, (2000).
- [54] Ayad et A. Haiahem, Réduction du frottement dans un contact segment racleur: chemise d'un moteur à combustion interne, *Revue des Energies Renouvelables*, 8 (2008) 37-50.
- [55] A. Martin, L'automobile: La technique automobile de l'apprentissage à la maîtrise, Lausanne, (1995).
- [56] N. Zabazas, Engineering thermodynamics, ENGRD 221, (2007).
- [57] Rachid Maamri, Modélisation et expérimentation des moteurs à combustion fonctionnant avec différents carburants de substitution et mélanges, Thèse de doctorat, Université de Québec, (2014).
- [58] Hassan Moussa Nahim, Contribution à la modélisation et à la prédiction de défaillances sur les moteurs Diesel marins, Thèse de doctorat, Université Aix Marseille, (2016).
- [59] M. Diaby, Compréhension des mécanismes de formation de dépôts en fond de première gorge de piston de moteur diesel, Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique de Paris, (2009).
- [60] M. Demers, Développement d'une méthodologie d'optimisation de la Maintenance par la fiabilité pour les systèmes complexes: application à un groupe électrogène Diesel de secours, Thèse de Doctorat, Université de Québec, (1998).
- [61] S. Nitonye, Design calculation for equipment and components specification of lubricating oil system of a tug boat, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 10 (2017) 449-462.
- [62] K. Kuiken, Diesel engines: Part 1, Target Global Energy Training, Onnen, (2012).
- [63] <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/8138/8138-diaporama-support-circuit-lubrification-asm-7.ppt>
- [64] https://cdn2.msmtorservice.com/fileadmin/media/MAM/PDF_Assets/Consommation-dhuile-et-perte-dhuile_51749.pdf
- [65] <https://entretien-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/670871/consommation-anormale-d-huile-moteur>

- [66] <http://leslubrifiants.com/2018/08/15/la-prevention-de-la-contamination-des-lubrifiants-attention-au-maillon-faible/>
- [67] <https://www.mecanique-bateau.com/depannage/anomalies-defaut-de-graissage>
- [68] <https://www.iespm.fr/comment-interpreter-un-diagnostic-moteur/>
- [69] D. Ljubas, H. Krpan, I. Matanoviæ, Influence of engine oils dilution by fuels on their viscosity, flash point and fire point, *NAFTA*, 61 (2010) 73-79.
- [70] J. Wakiru, L. Pintelon, P. Chemweno, P. Muchiri, Analysis of lubrication oil contamination by fuel dilution with application of cluster analysis, XVII International Scientific Conference on Industrial Systems, University of Novi Sad, Serbia, (2017) 252-257.
- [71] G.E. Newell, Oil analysis cost-effective machine condition monitoring technique, *Ind. Lubr. Tribol*, 51 (1999) 119–124.
- [72] B.H. Song, Y.H. Choi, Investigation of variations of lubricating oil diluted by post-injected fuel for the regeneration of CDPF and its effects on engine wear, *Mech. Sci. Technol*, 22 (2008) 2526–2533.
- [73] <https://entretien-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/640777/pression-d-huile-moteur-insuffisante>
- [74] G. Saporta, *Probabilités, analyse des données et statistique*, Paris, Technip, (2011).
- [75] Guillaume Lecuelle, *Analyse et modélisation de la Dominance Temporelle des Sensations à l'aide de processus stochastiques*, Université Bourgogne-Franche-Comte, (2019).
- [76] E. W. Montroll and J. L. Lebowitz, *Studies in Statistical Mechanics*, North-Holland Publishing Company–Amsterdam, New York, Oxford, (1979).
- [77] N. G. Van Kampen, *Stochastic Processes in Physics and Chemistry*, Elsevier, (2007).
- [78] R. Rémi, *Processus de Lévy et calcul stochastique*, Document de travail, Université Paris-Dauphine, (2010).
- [79] Houda Ghamlouch, *Modélisation de la dégradation- maintenance conditionnelle et pronostic: usage des processus de diffusion*, Thèse de doctorat, Université de Troyes, (2016).
- [80] C. Coccozza-Thivent, *Processus stochastique et fiabilité des systèmes*, volume 28 of *Mathématiques et Applications*, Springer Verlag, (1997).
- [81] Daniel Revuz et Marc Yor. *Continuous martingales and brownian motion*, grundlehren der mathematischen wissenschaften, Springer, 3rd édition, vol. 293, Springer-Verlag, Berlin, (1999).

- [82]L. Haitao, A. E. Elsayed, Reliability inference for field conditions from accelerated degradation testing, *Naval Research Logistics*, 53 (2006) 576–587.
- [83]Mikhail Nikulin, *Statistique des essais accélérés*, Hermes science publications, (2006).
- [84]J. Baussaron, B. Mihaela, R. Gerville-Reache, F. Guerin et P. Schimmerling, Estimation de la fiabilité à partir de mesures de dégradation : quelles méthodes utiliser, *La 17^{ème} Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement*, (2010).
- [85]D. Noyes, *Approche analytique par espace d'états: Markov*, Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de production. Collection IC2, Hermès, (2002).
- [86]Alberto Patron, Christian Cremona, *Modèle de chaînes de Markov pour l'étude de la fissuration par fatigue des assemblages soudés de ponts*, *Revue Européenne de Génie Civil*, 11 (2007) 1111-1133.
- [87]M. M. Mohammadi, M. Najafi, V. Kaushal, R. Serajiantehrani, N. Salehabadi and T. Ashoori, *Sewer Pipes Condition Prediction Models: A State-of-the-Art Review*, *Infrastructures* , 4 (2019) 1-16.
- [88]F. M. Yina, P. Alexander, D. L. F-M. Hanns, V. F. Joaquin, M. S. Guilherme, *Estimating bridge deterioration for small data sets using regression and Markov models*, *International scholarly and scientific research and innovation*,10 (2016) 663-670.
- [89]E. M. Abdelkader, O. Moselhi, M. Marzouk, T. Zayed, *Condition prediction of concrete bridge decks using Markov chain Monte Carlo-based method*, *Conference: 7th CSCE International Construction Specialty Conference Jointly with Construction Research Congress*, Laval, Canada, (2019).
- [90]T. Micevski, G. Kuczera and P. Coombes, *Markov model for storm water pipe deterioration*, *Infrastructure système*, 82 (2002) 49-56.
- [91]Julie Aubert, *Analyse statistique de données biologiques à haut débit*, Thèse de doctorat en mathématiques aux interfaces, Université Paris-Saclay, (2017).
- [92]Zheng Yuan, *Prediction of protein subcellular locations using Markov chain models*, *FEBS Letters*, 451 (1999) 23-26.
- [93]M. Borodovsky, J. D. McIninch, E. V. Koonin, K. E. Rudd, C. Me@digue and A. Danchin, *Nucleic acids research*, 23 (1995) 3554-3562.
- [94]M. Borodovsky, E. V. Koonin and K. E. Rudd, *Intrinsic and extrinsic approaches for detecting genes in a bacterial genome*, *Intrinsic and extrinsic approaches for detecting genes in a bacterial genome*, *Trends in biochemical sciences*, 19 (1994) 309-313.

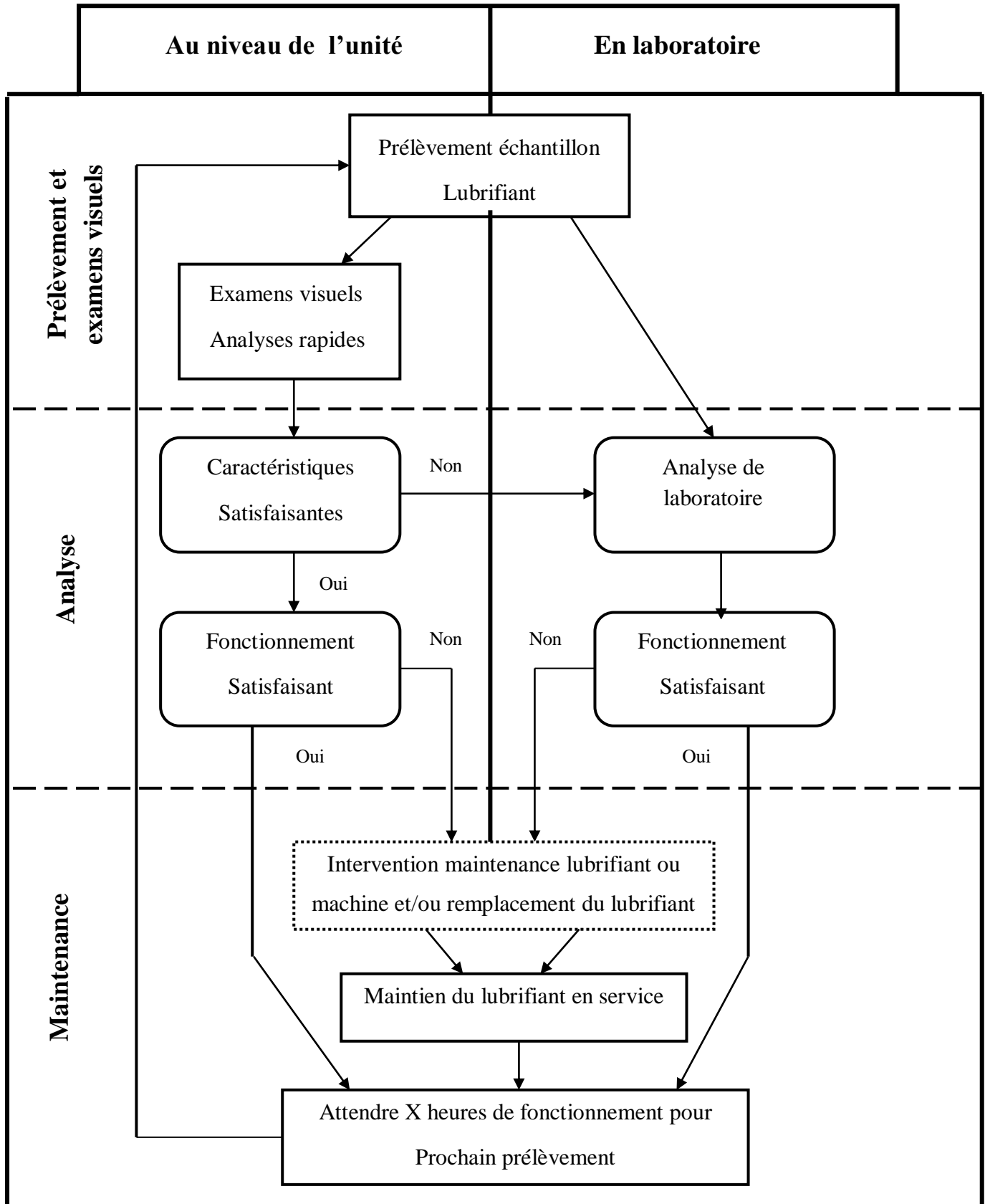
- [95] T. A. Chen, J. P. Moreno, T. M. O'Connor, S. O. Hughes, J. Baranowski, D. Woehler, R. T. Kimbro, C. A. Johnston, Obesity status transitions across the elementary years: use of Markov chain modelling, *Pediatricobesity*, 11 (2016) 88-94.
- [96] P. N. Spahn, H. Anders, A. H. Hansen, S. Kol, B. G. Voldborg, N. E. Lewis, Predictive glycoengineering of biosimilars using a Markov chain glycosylation model, *Biotechnology journal*, 12 (2017) 1-8.
- [97] F. A. Sonnenberg, J.R. Beck, Markov models in medical decision making : A practical guide, *Medical Decision Making*, 13 (1993) 322-338.
- [98] O. Alagoz, H. Hsu, A. J. Schaefer, M. S. Roberts, Markov decision processes: a tool for sequential decision making under uncertainty, *Medical Decision Making*, 30 (2010) 474–483.
- [99] Annett Baasch, Sabine Tischew and Helge Bruelheide, Twelve years of succession on sandy substrates in a post-mining landscape: a markov chain analysis, *Ecological Applications*, 20 (2010) 1136–1147.
- [100] Ashraf Farahat, Markov stochastic technique to determine galactic cosmic ray sources distribution, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 31(2010) 81–88.
- [101] Navaei, Markov chain for multiple hypotheses testing and identification of distributions for one object, *Pakistan Journal of Statistics*, 26 (2010) 557–562.
- [102] Y. Lu, M. Zhang, T. Yu, M. Qu, Application of Markov prediction method in the decision of insurance company, *International Conference on Logistic Engineering Management and Computer Science*, (2014). <http://dx.doi.org/10.2991/lemcs-14.2014.69>
- [103] H. Samet, A. Mojallal, Enhancement of electric arc furnace reactive power compensation using Grey-Markov prediction method, *Transmission & Distribution*, 8 (2014) 1626-1636.
- [104] A. Bouzaouit, E. H. Aouel, O. Bennis, Stochastic modeling for the follow-up the bearings degradation, *Scientific bulletin series D*, 79 (2017) 209-218 .
- [105] K. Fraedrich, K. Muller, On single station forecasting: Sunshine and rainfall Markov chains, *Beitr. Phys. Atmos*, 56 (1983) 208–134.
- [106] C. Liu, Y. M. Tian, X. H. Wang, 2011, Study of rainfall prediction model based on GM (1, 1)-Markov chain, *International Symposium on Water Resource and Environmental Protection ISWREP*, (2011) 744–747.
- [107] Y. Jin, Z. Xie, J. Chen, E. Chen, Phev power distribution fuzzy logic control strategy based on prediction, *Journal of Zhejiang University of Technology*, 43 (2015) 97–102.

- [108] J. Mar, F. Antoñanzas, R. Pradas, A. Arrospide, Probabilistic markov models in economic evaluation of health technologies: a practical guide, *Gaceta Sanitaria*, 24 (2010) 209–214
- [109] D. A. Darling, A. J. F. Siegert, The first passage problem for a continuous Markov process, *Annals of Mathematical Statistics*, 24 (1953) 624– 639.
- [110] C. E. A. Shannon, *Mathematical theory of Communication*, Bell system technical journal, 27 (1948) 379–423.
- [111] P. Billingsley, *Statistical methods in Markov chains*, In *Stanford meetings of the Institute of Mathematical Statistics*, Chicago, USA, (1960).
- [112] https://mship.no/1594-large_default/sacm-poyaud-a-12150-scr1-v12-generator-set-550-kwa.jpg
- [113] <http://www.normalab-france.fr/medias/boutique/1/62-tv2000.jpg>
- [114] <https://www.belub.com/stockage-des-lubrifiants/>
- [115] <https://www.total.fr/mon-vehicule/huiles/comment-bien-stocker-bidon-huile-moteu>

Annexe

Annexe A

Les opérations de la maintenance sur le lubrifiant au niveau du service de maintenance



Annexe B

L'entretien de moteur POYAUD DIESEL d'après le constructeur

Les opérations	Avant démarré	50 h	100 h	150 h	200 h	250 h	500 h	800h à 1000 h	2500h	5000 h	7500 h	15000 h
Niveau d'huile	*											
Refroidissement	*						*		*			
Combustible	*						*					
Filtre à combustible	*				*							
Robinet combustible	*								*			*
Régulateur hydraulique	*								*			
Filtre à air		*										
Vidange d'huile				*								
Graissage					*							
Filtre a huile			*			*						*
Pompe d'injection						*			*			
Culbuteur			*					*				
Turbocompresseur						*				*		
Injecteur								*				
Appareils contrôle								*				
Soupapes- Culasse									*			
Réfrigérants									*			
Crépine d'huile										*		
Bâti										*		
Bielles-Piston											*	
Révision générale												*
Pompe SIHI									*			
Gonfleur/Culasse												
Bouteille d'air												
Séparateur d'air												