

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



LVALEF

Département : Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Chimique

Analyse des huiles lubrifiantes en service en tant qu'outil d'aide à la décision en matière de maintenance prédictive des machines

Fatima Zohra DJAZOULI et Fella BOUSSARAKEBIR

Sous la direction de : M. Toudert AHMED ZAID

Professeur ENP

Sofiane MESSEKDJI

Ingénieur, CRD-SH

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2019

Composition du jury :

Président	M. Ammar SELATNIA	Pr	ENP
Rapporteurs/ Promoteurs	M. Toudert AHMED ZAID	Pr	ENP
	M. Sofiane MESSEKDJI	Ingénieur	CRD-SH
Examinatrices	Mme. Ouardia REBAS	MCB	ENP
	Mme. Yamina TCHOULAK	MAA	ENP
Invitée	Mme. Karima BOUFADENE	Chef de Département	CRD-SH

ENP 2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



LAVALEF

Département : Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Chimique

Analyse des huiles lubrifiantes en service en tant qu'outil d'aide à la décision en matière de maintenance prédictive des machines

Fatima Zohra DJAZOULI et Fella BOUSSARAKEBIR

Sous la direction de : M. Toudert AHMED ZAID

Professeur ENP

Sofiane MESSEKDJI

Ingénieur, CRD/SH

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2019

Composition du jury :

Président	M. Ammar SELATNIA	Pr	ENP
Rapporteurs/ Promoteurs	M. Toudert AHMED ZAID	Pr	ENP
	M. Sofiane MESSEKDJI	Ingénieur	CRD-SH
Examinatrices	Mme. Ouardia REBAS	MCB	ENP
	Mme. Yamina TCHOULAK	MAA	ENP
Invitée	Mme. Karima BOUFEDENE	Chef de Département	CRD-SH

ENP 2019

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier ALLAH le tout Puissant de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail particulièrement à mes chers parents qui ont consacré leur existence à bâtir la mienne. Pour leur soutien, leur patience, leur tendresse, leur affection et tous leurs sacrifices qui m'ont permis d'être ce que je suis aujourd'hui, je leur suis très reconnaissante. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments. Que dieu vous accorde la santé et une longue vie et que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Je dédie ce travail aussi à :

À mon frère Walid et ma sœur Kenza qui ont toujours été là pour moi, Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Que dieu vous préserve et vous procure la santé et une longue vie.

À ma grand-mère, à khalti Hamida et à ma tante Wassila. Vos prières, vos encouragements et votre soutien m'ont toujours été d'un grand secours. Puisse ALLAH, le tout puissant vous préserver du mal, vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

À ma grande famille : mes tantes, mes oncles ainsi que mes cousins et cousines.

À ma binôme et chère amie, Fella qui a accompli avec moi ce travail

A tous mes ami(e)s et toutes personnes qui me sont chers.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Fatima Zohra

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À ma chère mère, à mon cher père,

La source de ma vie, d'amour, d'affection, de générosité et de sacrifices, vous étiez toujours la près de moi pour me soutenir m'encourager et me guider avec les précieux conseils.

Que Dieu le tout puissant vous garde et vous procure une longue vie, santé et bonheur, puisse-t-il m'aider pour que je sois signe de votre confiance et à la hauteur de vos espérances.

Je souhaite que ce modeste travail soit le témoignage de ma gratitude, de mon admiration et surtout de mon respect envers vous mes chers parents.

Je dédie ce travail aussi :

À ma sœur Rym, merci d'être toujours à mes côtés, par ta présence, par ton amour, pour donner du goût et du sens à notre vie de famille. Puisse Dieu te garde, te procure santé, joie et bonheur.

À ma sœur Houda, à son mari Salim et à mon adorable nièce Israa, aucune phrase ne saurait exprimer toute l'affection et l'amour que j'ai pour vous. Je vous souhaite à travers ce travail une vie pleine de bonheur, santé et succès.

À ma chère grand-mère, que Dieu la garde.

À ma chère binôme Fatima, pour son entente et sa sympathie.

À toute ma famille, mes tantes, mes oncles ainsi que mes cousins et cousines.

À tous mes ami(e)s.

À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Fella

Remerciements

Nous remercions ALLAH tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour accomplir et réaliser ce travail.

Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos profonds remerciements et nos profondes reconnaissances à nos encadreurs : Pr T. Ahmed Zaid et M. S. Messekdji pour leur aide précieuse, la confiance qu'ils nous ont accordée, leurs encouragements et leurs conseils tout au long de ce projet sans lesquels ce travail n'aurait pas pu aboutir. Nous les remercions également pour leur écoute, leur patience et leur permanente disponibilité. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profond respect et de notre sincère gratitude.

Nos remerciements s'adressent également au Pr A. SELATNIA qui nous a fait l'honneur de présider le jury, à Mme. Y. Tchoulek et au Mme O. Rebas pour avoir accepté d'examiner et juger notre travail.

Nos sincères remerciements s'adressent à tous les enseignants du département de Génie Chimique qui se sont armés de patience et de pédagogie et surtout de beaucoup de compétences et de dévouement pour notre formation d'ingénieur. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Un grand merci à nos chers parents qui sans eux nous n'aurions pas pu atteindre cette réussite, à nos proches, nos ami(e)s qui nous ont encouragées, aidées et soutenues.

Enfin, nous adressons notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

ملخص: الصيانة التنبؤية للالات عن طريق تحليل زيوت التشحيم

توفر زيوت التشحيم عددا من الوظائف مثل تقليل الاحتكاك وتدهور الالات الصناعية. قد تتعرض زيوت التشحيم إلى التلوث وقد تفقد خصائصها الوقائية. فقدان زيوت التشحيم لخصائصها قد يؤدي إلى حدوث اضطرابات في الالات وفي بعض الحالات قد يؤدي إلى تآكلها. لهذا فإن مراقبة وتحليل هذه الزيوت يعد أمرا مهما لصيانتها. الغرض من هذه المذكرة هو مراقبة زيوت التشحيم في الخدمة لضمان توفر الالات.

الكلمات المفتاحية: زيوت التشحيم، تحليل، الصيانة التنبؤية، توربة 46، فودة 68 .

Abstrat: Predictive maintenance of rotating machines by oil analysis

Lubricating oils provide a number of functions such as reducing friction and wear in rotating machinery, and promoting heat transfer. Over time, these oils tend to degrade and lose their protective properties. Degradation and contamination of lubricating oils can cause significant disruption in the performance of rotating machinery and, in the most severe cases, lead to premature wear or even machine failure. The analysis of lubricants in service is of paramount importance in the predictive maintenance of machines. The purpose of this work is to improve the availability of rotating machines by monitoring the evolution of certain characteristics of lubricating oils in service.

Key words: Lubricating oil, Analysis, Predictive maintenance, TORBA 46, FODDA 68.

Résumé : Maintenance prédictive des machines tournantes par analyse d'huile

Les huiles lubrifiantes assurent un certain nombre de fonctions tels que la réduction des frottements et de l'usure des machines tournantes, et leur refroidissement. En service, ces huiles ont tendance à se dégrader et perdre leurs propriétés protectrices. La dégradation et la contamination des huiles lubrifiantes peuvent entraîner une perturbation importante des performances des machines tournantes et, dans les cas les plus sévères conduire à une usure prématurée voire une défaillance des machines. Pour cela l'analyse des lubrifiants en service revêt un caractère primordial dans la maintenance prédictive des machines. Le but de ce travail est d'améliorer la disponibilité des machines tournantes par le suivi de l'évolution de certaines caractéristiques des huiles lubrifiantes en service.

Mots clés : Huiles lubrifiantes, Analyse, Maintenance prédictive, TORBA46, FODDA68

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations et symboles

Introduction générale	13
Partie 1 : Revue bibliographique	16
Chapitre 1 : La maintenance	17
1.1. La maintenance industrielle	18
1.1.1. Maintenance corrective	18
1.1.2. Maintenance préventive	18
1.2. Maintenance prédictive	20
1.2.1. Analyse vibratoire	20
1.2.2. Analyse du bruit	21
1.2.3. La thermographie infrarouge	21
1.2.4. Maintenance prédictive par analyse d'huile	21
1.2.5. Choix de méthodes d'analyse	24
1.3. Objectifs visés par la maintenance	26
Chapitre2 : Généralités sur les lubrifiants	27
2.1. Définition des lubrifiants et leur rôle	28
2.1.1. Définition	28
2.1.2. Rôle	28
2.1.3. Origines des lubrifiants	29
2.2. Classification des lubrifiants	29
2.2.1. Lubrifiants gazeux	29
2.2.2. Lubrifiants liquides	29
2.2.3. Les lubrifiants semi-solides (ou plastques)	29
2.2.4. Lubrifiants solides	30
2.3. Régimes de lubrification	30
2.3.1. Lubrification hydrostatique	30
2.3.2. Lubrification hydrodynamique	30
2.3.3. Lubrification elastohydrodynamique	31
2.3.4. Lubrification mixte	31
2.3.5. Lubrification limite	31
2.4. Fabrication des huiles lubrifiantes	32
2.4.1. Les bases	32
2.4.2. Les additifs	35

2.5.	Classification des huiles lubrifiantes	37
2.5.1.	Le système ASTM D 2422	37
2.5.2.	Le système ISO	38
2.5.3.	Les systèmes SAE	39
2.6.	Propriétés des huiles	41
2.6.1.	Propriétés massiques	41
2.6.2.	Propriétés optiques	41
2.6.3.	Propriétés électriques	41
2.6.4.	Propriétés thermiques	42
2.6.5.	Propriétés rhéologiques	42
2.6.6.	Propriétés chimiques	43
Chapitre 3 : Les huiles en service		45
3.1.	Contamination des huiles lubrifiantes en service	46
3.1.1.	Contamination solide	46
3.1.2.	Contamination liquide (eau)	49
3.1.3.	Contamination gazeuse (par l'air)	51
3.2.	Dégradation des huiles lubrifiantes	53
3.2.1.	Oxydation	53
3.2.2.	L'hydrolyse	53
3.2.3.	La polymérisation	53
3.3.	Effets potentiels des huiles sur l'environnement et la santé humaine	53
Partie 2 : Étude expérimentale		56
Chapitre 4 : Analyses et interprétations		57
4.1.	Matériels et méthodes	59
4.1.1.	Analyses des huiles	59
4.1.2.	Analyse des contaminants	64
4.1.3.	Analyse des métaux (ASTM D6595)	65
4.2.	Résultats d'analyses et interprétations	67
4.2.1.	Huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01	67
4.1.2.	Huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603	78
4.2.3.	Huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201	90
4.3.	État des huiles en service	101
Conclusion générale		102
Bibliographie		104
ANNEXES		108

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Différentes techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante.....	25
Tableau 2.1 : Classification ASTM de viscosité des lubrifiants industriels (ASTM D 2422).....	38
Tableau 2.2: Classification de viscosité ISO des lubrifiants liquides industriels	39
Tableau 2.3: Classification SAE des huiles moteurs (Décembre 99)	40
Tableau 3.1: Classification des particules selon la forme selon Hunt	47
Tableau 3.2: Les contaminants solides	48
Tableau 4.1: Machines tournantes et huiles lubrifiantes utilisées.....	58
Tableau 4.2: Spécification des huiles FODDA 68, TORBA 46 et TORBA 68.....	58
Tableau 4.3: Caractéristiques des huiles en service étudiées d'après la norme ASTM D6224.	59
Tableau 4.4: Résultats d'analyse de l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01.	67
Tableau 4.5: Résultats d'analyse des métaux dans l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01.	68
Tableau 4.6: Résultats d'analyse de l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603.....	78
Tableau 4.7: Résultats d'analyse des métaux dans l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603.	79
Tableau 4.8: Résultats d'analyse de l'huile TORBA 68 en service dans le TurboexpanderEC- 201.....	90
Tableau 4.9: Résultats d'analyse des métaux dans l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpanderEC-201.	91

Liste des figures

Figure1.1: Forme de la maintenance selon la norme NF EN 13306 (2001)	19
Figure2.1 : Les deux systèmes de guidages d'arbre.....	31
Figure 2.2: Principe de la lubrification élastohydrodynamique.....	31
Figure 2.3: Schéma de fabrication des huiles minérales industrielles de base conventionnelles	33
Figure 2.4: Schéma de fabrication des huiles de base non conventionnelles.....	34
Figure 4.1: Échelle de couleur ASTM par pas de 0,5.	63
Figure 4.2: Classification des bandes de cuivre.....	64
Figure4.3: Variation de la masse volumique à 15°C de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.	69
Figure 4.4: Variation de la viscosité cinématique à 40°C de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.	70
Figure 4.5: Variation de la viscosité cinématique à 40°C de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.	70
Figure 4.6: Variation de l'indice de viscosité de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.	71
Figure 4.7: Variation de point d'éclair de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.	72
Figure 4.8: Variation de point d'écoulement de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.	73
Figure4.9: Évolution de la teneur en métaux d'usure dans l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01	74
Figure 4.10: Évolution de la teneur en additifs dans l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.....	76
Figure 4.11: Évolution de la teneur en phosphore dans l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.	76
Figure 4.12: Évolution de la teneur en polluants dans l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.....	77
Figure 4.13: Variation de la masse volumique à 15 °C de l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603.	80
Figure 4.14: Variation de la viscosité à 40°C de l'huile TORBA 46 dans le turbocompresseur CD-603.....	81
Figure 4.15: Variation de la viscosité à 100 °C de l'huile en service TORBA 46 dans le turbocompresseur CD-603.	82
Figure 4.16: Variation de l'indice de viscosité de l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603.	83
Figure 4.17: Variation de l'indice d'acide total de l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603.	84
Figure 4.18: Variation de point d'éclair de l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603	84
Figure 4.19: Variation de point d'écoulement de l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603.....	85

Liste des figures

Figure 4.20: Évolution de la teneur en métaux d'usure dans l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603.....	87
Figure 4.21: Évolution de la teneur en additifs dans l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603.....	88
Figure 4.22: Évolution de la teneur en pollutions dans l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603.....	89
Figure 4.23: Variation de la masse volumique à 15°C de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.....	92
Figure 4.24: Variation de la viscosité cinématique à 40°C de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.....	93
Figure 4.25: Variation de la viscosité cinématique à 100°C de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.....	94
Figure 4.26: Variation de l'indice de viscosité de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.....	95
Figure 4.27: Variation de l'indice d'acide total de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.....	95
Figure 4.28: Variation de point d'éclair de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.....	96
Figure 4.29: Variation de point d'écoulement de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.....	97
Figure 4.30 : Évolution de la teneur en métaux d'usure dans l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.....	98
Figure 4.31: Évolution de la teneur en additifs dans l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.....	99
Figure 4.32: Évolution de la teneur en polluants dans l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.....	100

Liste des abréviations et symboles

AFNOR : Association Française de Normalisation.

AN: Acid Number.

API: American Petroleum Institute.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

BN: Base Number.

BSW: Bottom Sediment Waters.

CCR : Conradson carbon residue

cSt: CentiStocks.

DAB: Dialkylbénzène.

DTPZn: Dialkyldithiophosphate de zinc.

EHD : Elastohydrodynamique.

EP : Extrême Pression.

EP : Point équivalence.

ISO: International Organisation for Standardization.

MTTR: Mean Time To Repair.

NAFTEC : Société Nationale de Raffinage de Pétrole.

PAO : Polyalphaoléfine.

ppm : Partie par million.

RDE-AES: Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectroscopy

SAE: Society of Automotive Engineers

SSU: Seconde Saybolt Universel.

TAN: Total Acid Number.

TBN: Total Base Number.

VI : Viscosité Index.

ZDDP : Dialkyldithiophosphate de zinc

Liste des abréviations et symboles

NF : Norme Française.

Al: Aluminium.

Ag: Argent.

B: Bore.

Ca : Calcium.

Cr : Chrome.

Cu : Cuivre.

Sn : Étain.

Fe : Fer.

Mg : Magnésium.

Mo : Molybdène.

Ni : Nickel.

P : Phosphore.

Pb : Plomb.

Si : Silicium.

Na : Sodium.

Zn : Zinc.

Introduction générale

Dans différents domaines de l'industrie et du transport, les machines tournantes ont un grand intérêt, elles sont le plus souvent stratégiques et vitales. Pour prévenir les défaillances et assurer une disponibilité optimale de ces machines, il faut surveiller en permanence ces équipements et “traquer” tous les signes précurseurs de défauts avant qu’il ne soit trop tard (Hachemi, 2012). Pour cela, il existe une grande variété de techniques d’analyse comme l’analyse vibratoire, l’analyse des lubrifiants, la thermographie et l’analyse acoustique qui rentrent dans le cadre de la maintenance prédictive, également connue sous le nom de maintenance conditionnelle, qui utilise l’analyse prédictive sur des données en temps réel collectées (transmises en continu) depuis des parties de la machine vers un processeur centralisé qui détecte les variations des paramètres fonctionnels pouvant potentiellement conduire à des pannes. La nature en temps réel de l’analyse permet d’identifier les pannes fonctionnelles bien avant qu’elles ne surviennent, mais peu de temps après leur cause potentielle (Palem, 2013).

Les machines tournantes sont le plus souvent munies d’un système de lubrification qui assure la protection des différentes pièces en mouvement (paliers, roulements, arbre, etc.) par le biais d’un film d’huile qui évite le contact direct, métal-métal, réduit les frottements, évite l’usure des pièces et permet d’évacuer la chaleur. Pour remplir sa fonction, le lubrifiant doit avoir des caractéristiques physico-chimiques déterminées. Or, ces caractéristiques se trouvent modifiées sous l’action de phénomènes de contamination et de dégradation qui finissent par rendre l’huile inapte à son emploi.

L’huile en service dans une machine tournante subit des contraintes physiques (pressions et températures élevées), des contraintes mécaniques (chocs et martèlement par les pièces en mouvement), l’action des divers polluants (par les produits liquides ou solides mais aussi par fixation d’oxygène), ces contraintes peuvent entraîner une contamination et/ou une dégradation des huiles.

La contamination est la cause principale des pannes produites dans les machines tournantes car, elle influe directement sur les propriétés du lubrifiant et la dégradation des organes des machines tournantes (paliers, roulements, engrenages, etc.) (Boucheriet et al, 2016). La contamination peut être liquide comme la contamination par l’eau qui perturbe les caractéristiques de l’huile et peut avoir un effet néfaste sur les composants du système (corrosion et usure), elle peut être solide, par des particules issues de l’usure ou par la poussière; la contamination peut être aussi gazeuse.

La dégradation peut également être due à l'oxydation qui se produit par l'action combinée de l'air et de températures élevées ou par des phénomènes d'hydrolyse.

Les analyses de l'huile en service poursuivent deux objectifs ; le premier, la maintenance des lubrifiants (contamination et dégradation), et le deuxième, la maintenance de l'équipement.

Pendant longtemps, l'analyse de l'huile a été largement acceptée comme l'une des procédures de base de maintenance prédictive, principalement axée sur la détermination de la variation des caractéristiques importantes de l'huile. Comme facteur presque invariable, il est accepté le fait que l'analyse d'huile est principalement une activité de laboratoire en raison de la complexité de l'équipement, des techniciens spécialisés et des compétences nécessaires pour interpréter les résultats de l'analyse. (Macuzic et Jermic, 2004)

L'analyse physico-chimique d'un échantillon d'huile peut donner des informations sur l'état de l'huile et l'état de l'équipement. Mais, afin de pouvoir dresser le diagnostic le plus précis possible sur une charge d'huile et sur le matériel qu'elle lubrifie, il convient de suivre régulièrement les évolutions des caractéristiques de l'huile et de comparer les résultats obtenus à chaque analyse d'une fois sur l'autre et par rapport aux caractéristiques de l'huile neuve. Il conviendra d'intervenir si l'on constate une évolution brutale des caractéristiques ou si l'on s'éloigne trop des valeurs initiales. L'intervention se fera au niveau du matériel ou en procédant à la vidange et au remplacement de l'huile.

Le but de ce travail consiste en la caractérisation physico-chimique de quelques huiles en service dans des équipements de Sonatrach et l'analyse qualitative et quantitative des contaminations de ces huiles au cours de leur utilisation.

Ce travail comporte deux parties :

La première partie est dédiée à une revue bibliographique qui comporte trois chapitres :

- **Le chapitre 1** décrit les grands principes de la maintenance, plus précisément la maintenance prédictive et donne les différentes méthodes qui existent.
- **Le chapitre 2** présente les types de lubrifiants, leurs procédés de fabrication et leurs principales propriétés.
- **Le chapitre 3** présente les différents phénomènes que l'huile en service peut subir durant leur utilisation et les conséquences sur le fonctionnement de l'équipement.

La deuxième partie est réservée à l'étude expérimentale qui consiste en des essais de caractérisation des huiles étudiées. Des valeurs issues de campagnes de mesures des caractéristiques des huiles échelonnées dans le temps nous ont permis d'établir des diagnostics sur l'état de l'huile et d'expliquer l'origine des contaminations et de la

dégradation de certaines caractéristiques. Des informations plus détaillées fournies par les fabricants des machines et des lubrifiants utilisés nous auraient grandement aidées à peaufiner une stratégie de prévention des pannes par l'analyse des huiles lubrifiantes.

Partie 1 :
Revue
bibliographique

Chapitre 1 : La maintenance

Chapitre 1 : La maintenance

1. La maintenance

1.1. La maintenance industrielle

Le fonctionnement d'une installation, même dans des conditions normales entraîne un certain vieillissement des matériels, et parfois même des incidents ou accidents. Il est nécessaire pour en assurer une exploitation correcte de maintenir cette installation en bon état (Morel, 2002).

D'après l'Afnor (FD X 60-000), « La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité (Héng, 2011).

On distingue deux types de maintenance figure (1.1) :

1.1.1. Maintenance corrective (Duchemin, 2017)

L'opération de maintenance intervient après défaillance. C'est l'attitude qui consiste à attendre la panne pour procéder à une intervention. Elle peut se décomposer en deux branches: la maintenance palliative et la maintenance curative.

- a. **Maintenance palliative** : l'action de dépannage permet de remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable mais inférieur au niveau optimal.
- b. **Maintenance curative** : l'intervention qui suit la défaillance permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel.

L'un des outils de la maintenance corrective doit permettre une identification fiable du défaut de fonctionnement, ce qui permettra de réduire le MTTR en intervenant uniquement sur le ou les organes concernés. L'intervention « au hasard » sur les organes est à proscrire.

1.1.2. Maintenance préventive

Les interventions de maintenance sont déclenchées avant les défaillances et en fonction d'un paramètre. On cherche alors à tendre vers un taux de défaillance nul en effectuant les interventions permettant le maintien du niveau de performance requis avant l'apparition du défaut. Elle se décompose en deux branches : la maintenance systématique et la maintenance conditionnelle (Duchemin, 2017).

a. Maintenance préventive systématique

Une action de maintenance préventive systématique a pour principe de mettre en place des opérations de maintenance (entretien, réparation) avant l'occurrence de la défaillance. Progressivement, les responsables d'usines sont encouragés à développer des programmes de maintenance préventive. Ces programmes, s'ils permettent de réduire les temps d'arrêt de production, ont souvent un coût élevé, car ils nécessitent le remplacement de certains éléments du système avant leur défaillance et génèrent ainsi des charges de travail et des coûts de pièces de rechange (Heintz et al, 2018).

b. Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle repose sur l'analyse d'indicateurs en temps réel sur les équipements industriels (par exemple les vibrations, la température...). La maintenance conditionnelle a pour objectif la détection d'anomalies dans le fonctionnement des machines industrielles : la découverte de changements dans leurs caractéristiques annonce une défaillance à venir. La maintenance préventive conditionnelle permet de mieux tenir compte des conditions d'utilisation d'un équipement, mais elle nécessite la mise en place d'indicateurs de dégradation (capteurs ou sondes) et la définition d'un seuil limite pour ces indicateurs considérés comme acceptable pour le fonctionnement du système. Les actions de maintenance sont programmées dès le dépassement du seuil (Heintz et al, 2018).

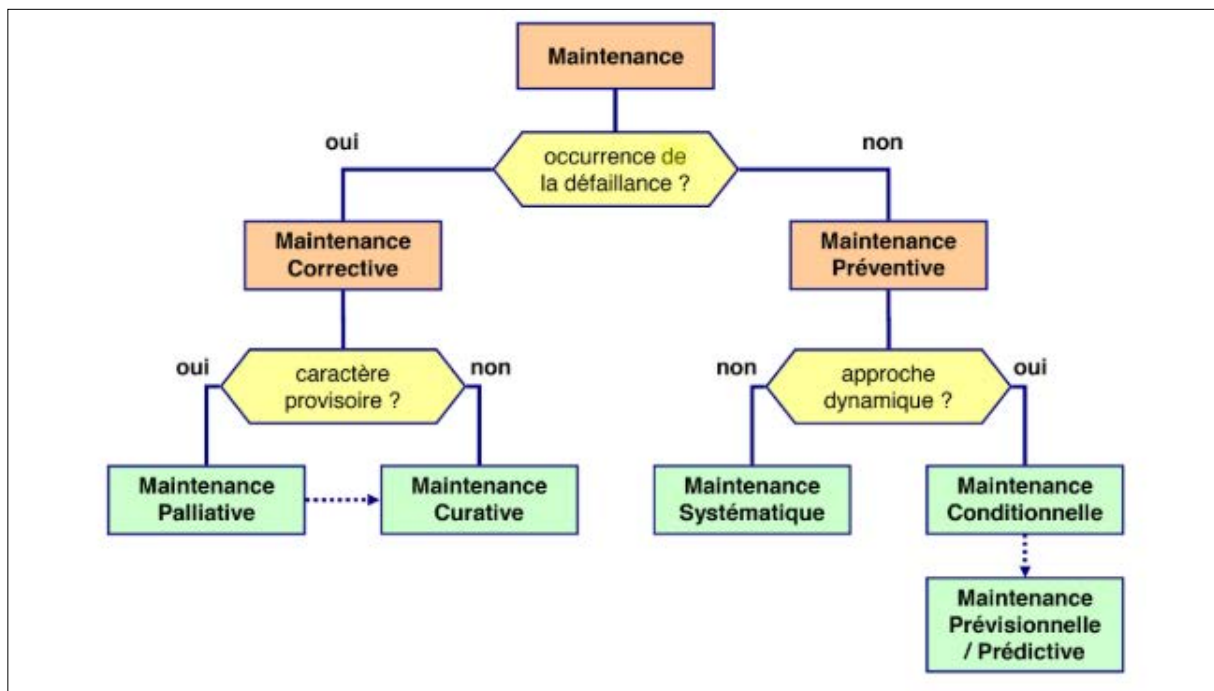


Figure 1.1: Forme de la maintenance selon la norme NF EN 13306 (2001) (Gouriveau et al, 2017).

1.2. Maintenance prédictive

Elle est définie comme « une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien ». L'idée sous-jacente est de projeter l'état actuel du bien dans le future, afin d'estimer le temps de fonctionnement avant la défaillance. La maintenance prédictive est ainsi plus dynamique. Elle prend en compte les conditions actuelles des équipements et tente de prévoir l'évolution dans l'état des biens. Les interventions de maintenance étant planifiées avec davantage de précision, la maintenance prédictive doit permettre de faire des économies substantielles et fait l'objet d'une attention grandissante depuis quelque années (Gouriveau et al, 2017).

La maintenance prédictive est bien plus que cela. C'est le moyen d'améliorer la productivité, la qualité du produit et l'efficacité globale des usines de fabrication et de production. Un programme de maintenance prédictive peut minimiser les pannes imprévues de tout l'équipement mécanique de l'usine et garantir que l'équipement réparé est dans un état mécanique acceptable. Le programme peut également identifier les problèmes de machine-train avant qu'ils ne deviennent sérieux. Si le problème est détecté tôt, des réparations majeures peuvent généralement être évitées (Mobley, 2002).

Parmi les outils les plus couramment utilisés pour réaliser cette maintenance prédictive, il y a (Thomas, 2012) :

- L'analyse des vibrations, qui est une image des défauts mécaniques des systèmes.
- L'analyse d'huile qui permet de qualifier et quantifier les particules métalliques résiduelles provenant de l'usure dans un bain d'huile.
- La thermographie pour mesurer l'échauffement des pièces de contact.
- La mesure du bruit, lorsque le milieu environnant le permet.

1.2.1. Analyse vibratoire

La plupart des installations étant constituées de systèmes électromécaniques, la surveillance des vibrations est le principal outil de maintenance prédictive. Au cours des 10 dernières années, la plupart de ces programmes ont adopté l'utilisation de collecteurs de données monocanaux basés sur un microprocesseur et d'un logiciel pour acquérir, gérer, suivre et évaluer l'énergie de vibration créée par ces systèmes électromécaniques. Bien que cette approche soit une méthodologie de maintenance prédictive précieuse, les limitations de ces systèmes peuvent limiter les avantages potentiels (Mobley, 2002).

1.2.2. Analyse du bruit

Le changement de bruit est souvent un phénomène créé par une défaillance et la mesure du bruit des machines par mesure des vibrations peut être un indice de défektivité. Le stéthoscope, qui comprend un casque et une sonde, est un instrument qui permet, par l'écoute des bruits de la machine pour des fréquences variant entre 30 et 15000 Hz, de détecter les composants défectueux. La technique consiste à comparer subjectivement les bruits avec des bruits de référence préenregistrés (Thomas, 2012).

1.2.3. La thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique rapide et sans contact, qui permet de mesurer la luminance, d'établir une cartographie de la température et de suivre son évolution dans le temps. Le but n'est pas d'obtenir une valeur absolue de la température, mais plutôt de mesurer sa variabilité. Le principe consiste à mesurer le rayonnement électromagnétique émis par les objets dès que leur température dépasse le zéro absolu. La loi de Planck a montré que ce rayonnement concerne le spectre infrarouge aux températures inférieures à 800°C pour des longueurs d'ondes du rayonnement comprises entre 0,5 et 500 μ m. Par contre, la technique est très sensible aux conditions environnementales (émissivités, température de l'environnement, humidité, etc.) et son utilisation demande des précautions. La thermographie infrarouge permet de mettre en évidence de nombreux défauts sans contact et de manière non destructive. En maintenance conditionnelle, la thermographie est utilisée pour vérifier le serrage des cosses électrique, contrôler le vieillissement de composant électroniques, de mettre en évidence des défauts d'alignements, d'usure de paliers, de manque de graissage. Elle est aussi utilisée pour vérifier les déperditions de chaleur sur les éléments chauffants et leur réfractaires, ou mettre à jour des fuites de fluide. Elle est souvent associée à l'analyse vibratoire sur les machines tournantes (Thomas, 2012).

1.2.4. Maintenance prédictive par analyse d'huile

Les principales applications de l'analyse des huiles de lubrification sont le contrôle de la qualité, la réduction des stocks d'huile de lubrification et la détermination de l'intervalle le plus rentable pour la vidange. Les résultats d'analyse peuvent être utilisés pour déterminer si l'huile répond aux exigences de lubrification de la machine ou de l'application. Sur la base des résultats de l'analyse, les lubrifiants peuvent être modifiés ou mis à niveau pour répondre aux exigences de fonctionnement spécifiques (Moblely, 2002).

L'analyse des huiles comprend aussi l'analyse des particules d'usure, qui fournit des informations directes sur l'état d'usure du train de machines. Les particules contenues dans le lubrifiant d'une machine peuvent fournir des informations importantes sur son état. Ces informations proviennent de l'étude de la forme, de la composition, de la taille et de la quantité des particules (Mobley, 2002).

L'analyse peut être découpée en quatre catégories (Ville, 1998) :

- Examens physico-chimiques.
- Comptage de particules.
- Examens spectroscopiques.
- Examens ferrographiques.

a. Examens physico-chimiques

• La viscosité

C'est la propriété la plus importante d'une huile lubrifiante. La viscosité réelle des échantillons d'huile est comparée à un échantillon non utilisé afin de déterminer l'amincissement ou l'épaississement de l'échantillon lors de son utilisation (Keith Mobley, 2002).

La viscosité d'une huile peut augmenter en fonction d'un certain nombre de raisons, notamment de la polymérisation, de l'oxydation, de la perte de fractions légères par évaporation et de la formation de substances insolubles d'oxyde et de carbone. Les contaminants tels que l'eau, l'air, suie, antigel et l'ajout d'une mauvaise huile, peuvent également faire augmenter la viscosité d'une huile (Evans, 2016).

La viscosité peut également diminuer pour les motifs suivants (Denis, 1997) :

- Dilution par le carburant (essence, gazole), dans le cas d'huile moteur.
- Cisaillement mécanique ou thermo-oxydant qui diminue le pouvoir épaississant des additifs polymères améliorant l'indice de viscosité.
- Dégradation de certaines huiles de base d'origine synthétique, par dépolymérisation de l'oligomère, si les températures d'utilisation sont élevées ou si la protection antioxydante est insuffisante.

• Taux d'acidité

Les huiles neuves ou usées peuvent contenir des constituants acides présents en tant qu'additifs ou en tant que produits de dégradation formés pendant le service, tels que les produits d'oxydation. La quantité relative de ces matériaux peut être déterminée en titrant avec

des bases. L'indice d'acide est une mesure de cette quantité de substance acide dans l'huile, toujours dans les conditions de l'essai. L'indice d'acide est utilisé comme guide dans le contrôle de la qualité des formulations d'huiles lubrifiantes. Il est également parfois utilisé comme mesure de la dégradation du lubrifiant en service (ASTM D664, 2004).

- **Teneur en eau**

L'eau est l'un des contaminants les plus fréquents. Elle peut être introduite dans un système par le biais de fuites internes de liquide de refroidissement, au cours du nettoyage d'une durite haute pression ou par condensation de l'air au cours du refroidissement du système (Mayer, 2016).

- b. Comptage de particules** (Giroud, 2016)

Le comptage de particules consiste à analyser la contamination solide dans un lubrifiant par le comptage du nombre de particules et le classement du niveau de contamination en fonction de la taille/concentration de particules. Connaître le niveau de propreté d'un fluide est fondamental lors de la réalisation d'un contrôle de la contamination présente sur le système.

Les résultats sont exprimés selon la norme ISO 4406 : la classe de pollution est définie par 3 nombre :

- Le premier indique le nombre de particule $> 4 \mu\text{m}$.
- Le second indique le nombre de particule $> 6\mu\text{m}$.
- Le troisième indique le nombre de particule $> 14 \mu\text{m}$.

Si le nombre de particules est élevé, une filtration sera préconisée.

- c. Examens spectroscopiques**

- **Oxydation**

Au fur et à mesure de son oxydation, la capacité de lubrification d'une huile diminue et, en cas d'oxydation majeure, il se produit des changements manifestes dans l'huile : elle devient plus sombre et dégage une odeur ; des vernis, des laques et des résines se forment et, à un stade avancé, la viscosité de l'huile augmente, généralement rapidement (Mayer, 2016).

- **Spectrographie d'émission**

La spectroscopie permet de déterminer les différents composants du contaminant. La concentration des divers éléments polluants peut être déterminée par spectrographie d'émission. Les particules détectées sont inférieures à $10 \mu\text{m}$. il est conseillé de compléter cette analyse par la méthode d'absorption atomique ou par la méthode de torche à plasma (Thomas, 2012).

d. Examens ferrographiques (Ville, 1998)

La ferrographie se décline en deux types :

- à lecture directe. Elle donne un indice de sévérité d'usure ;
- analytique. Elle est alors utilisée pour obtenir des informations sur la forme, la taille et la nature des particules métalliques présentes dans l'huile.

Elles utilisent le même principe de base. Il consiste à faire s'écouler l'huile sur une plaquette disposée au-dessus d'un champ magnétique. Les particules se déposent alors suivant leur taille. L'analyse de la plaquette permet de déterminer la nature des diverses particules.

Il apparaît ainsi que l'ensemble de ces techniques permet de connaître le niveau d'usure d'un mécanisme mais aussi la quantité et la nature des polluants présents. Cette technique de l'analyse d'huile prend aujourd'hui un rôle important dans le domaine de la maintenance. En effet en effectuant des prélèvements réguliers, il est possible de connaître avec précision l'état de fonctionnement du mécanisme exploré. Les opérations de maintenance ne sont alors effectuées que lorsque cela est nécessaire et non systématiquement comme cela se fait habituellement. Par exemple, il est possible de déterminer si le joint de culasse d'un moteur est en fin de vie. En effet par la détection d'eau dans l'huile couplée à la présence de sodium ou de bore (éléments constitutifs du joint), le diagnostic est établi avec certitude.

Dans le travail mené sur le rôle de la pollution solide des lubrifiants, l'analyse d'huile est en fait un outil qui permet d'obtenir le type de particules rencontrées dans les mécanismes lubrifiés.

1.2.5. Choix de méthodes d'analyse

Chaque méthode a son champ d'application privilégié. Par exemple, l'analyse vibratoire convient aux défauts liés à la cinématique et à la structure de la machine, mais dans une plage de fréquences déterminées). Elle couvre aussi les défauts spécifiques aux roulements. L'analyse acoustique se limite à la détection de bruits dans les fréquences audibles, mais lorsque la dégradation d'un roulement se manifeste en une fréquence audible, il est souvent trop tard pour intervenir. L'analyse d'huile consiste principalement à analyser les particules présentes dans l'huile, ce qui va révéler une usure anormale d'un ou plusieurs organes. Elle doit être appliquée dans le cas de machines où l'huile joue un rôle primordial et lorsque l'analyse des débris d'usure est significative (Chapelot, 2003)

Le tableau (1.1) donne l'avantage, l'inconvénient et le champ d'application des quatre méthodes.

Chapitre 1 : la maintenance

Tableau 1.1: Différentes techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante (Chapelot M., 2003)

	Principaux avantages	Principales limitations	Champs d'applications privilégié
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade précoce ; - Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi ; - Autorise une surveillance continue ; - Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance). 	<ul style="list-style-type: none"> - Spectres parfois difficile à interpréter ; - Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure.
Analyse d'huile	<ul style="list-style-type: none"> - Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement ; - Possibilités de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne permet pas de localiser précisément le défaut ; - Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrifiant ; - Analyse des éléments d'usure.
Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation ; - Interprétation souvent immédiate des résultats. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire ; - Contrôle limité à ce que «voit» la caméra (échauffements de surface) ; - Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de de lubrification en particulier).
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de détecter l'apparition des défauts audibles ; - Autorise une surveillance continue. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant ; - Diagnostic souvent difficile à réaliser ; - Problèmes de répétabilité des mesures. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire

1.3. Objectifs visés par la maintenance (Héng, 2011)

- Améliorer la fiabilité du matériel.
- Garantir la qualité des produits.
- Améliorer l'ordonnancement des travaux.
- Assurer la sécurité des travailleurs.
- Améliorer la gestion des stocks.
- Améliorer le climat des relations humaines.

En résumé, il faudra examiner les différents services rendus pour apprécier les enjeux de la maintenance préventive :

- la sécurité : diminution du nombre d'avaries en service ayant pour conséquence des catastrophes ;
- la fiabilité : amélioration, connaissance des matériels ;
- la production : moins de pannes en production.

Chapitre 2 : Généralités sur les lubrifiants

Chapitre 2 : Généralités sur les lubrifiants

2. Généralité sur les lubrifiants

2.1. Définition des lubrifiants et leur rôle

2.1.1. Définition

Un lubrifiant, du mot latin «lubricus» à savoir glissant, est une huile onctueuse, généralement d'origine pétrolière, utilisée pour lubrifier le mouvement d'une machine ou d'un outil en rendant glissantes et en refroidissant les surfaces métalliques en contact (Chitour, 1997).

2.1.2. Rôle

L'utilisation d'un lubrifiant devant agir comme matériau intermédiaire entre des corps opposés, en mouvement l'un par rapport à l'autre, afin de réduire le frottement, est connu depuis l'antiquité. Tout mouvement mécanique implique la transformation d'énergie, avec pour résultat une part de travail utile, et d'autre part ce qu'il est habituel d'appeler « la perte de rendement », résultant généralement en production de chaleur (Chitour, 1997).

La lubrification a pour objectifs principaux de (Richar et Roux, 1968)

- Réduire les frottements dans les machines et par conséquent économiser l'énergie.
- Participer au refroidissement des machines, étant en contact intime avec les organes mécaniques, souvent très chauds, le lubrifiant contribue d'une façon très active à leur refroidissement et à l'évacuation de calories s'il circule et, s'il peut céder sa chaleur au milieu extérieur.
- Combattre l'usure des machines sous toutes ses formes : usure adhésive et grippage, usure par fatigue, corrosion de contact.
- Protéger les organes contre les corrosions humide et acide.
- Garder propres les surfaces et les circuits en neutralisant ou en évacuant les produits indésirables : poussières, débris d'usure, produits de dégradation thermique ou chimique du lubrifiant (verniss, boues, carbone, etc.), eau.
- Absorber les chocs et réduire le bruit.
- Permettre la mise en route de l'organe à lubrifier à toutes températures.
- Assurer des fonctions passives telles que : résistances au feu, au moussage, neutralité vis-à-vis des élastomères, des plastiques et des peintures.

2.1.3. Origines des lubrifiants

Les premières huiles utilisées par l'homme provenaient du règne animal ou végétal (huile de poisson, de foie de morue, d'olive, de ricin, d'arachides...). Ces huiles sont utilisées en pharmacie et dans l'alimentation.

Dans les domaines de l'aviation et des équipements de méthaniers, on utilise des huiles de synthèse obtenues par synthèse organique à partir des composés organiques (ester, silicones, polyglycol). Les huiles minérales sont définies comme étant des huiles dérivées du pétrole. Elles répondent aux besoins de toutes sortes de machines quelles que soient les conditions opératoires (Chitour, 1997).

2.2. Classification des lubrifiants

Parmi les huiles lubrifiantes, nous distinguons : les lubrifiants gazeux, liquides, semi-solides ou plastiques et solides (Groff, 1961) :

2.2.1. Lubrifiants gazeux

Ils sont utilisés dans les mécanismes peu chargés tournant à très grandes vitesses. Avec les gaz, le coefficient de frottement est extrêmement faible.

Exemple : l'air est le lubrifiant idéal dans les machines industrielles alimentaires où toute contamination doit être évitée.

2.2.2. Lubrifiants liquides

Ils sont le plus souvent utilisés dans les mécanismes chargés tels que les moteurs alternatifs, les turbines à vapeur, etc.

Parmi les lubrifiants liquides, les huiles minérales d'origine pétrolières sont les plus utilisées.

2.2.3. Les lubrifiants semi-solides (ou plastiques)

Ils sont constitués de corps gras d'origine animale ou végétale, de corps gras saponifiés, de gel divers, etc.

Les plastiques sont utilisés essentiellement dans le garnissage ainsi que dans les mécanismes tels que roulements, joints, etc. qui équipent les matériaux agricoles et ferroviaires.

2.2.4. Lubrifiants solides (Schilling, 1976)

La plupart des lubrifiants solides ne présentent une action lubrifiante que s'ils sont incorporés à un milieu porteur, par exemple, de l'huile.

Ils doivent avoir un certain nombre de propriétés :

- Un faible coefficient de frottement ;
- Une grande résistance à la charge ;
- Aucune réaction avec la surface, aucune dissolution ;
- Une bonne adhérence à la surface.

Les lubrifiants solides sont de type très divers. Les plus fréquemment utilisés sont ceux dits « lamellaires » : le graphite, le bisulfure de molybdène (MoS_2). Ces lubrifiants sont très utiles quand les charges sont très élevées et les vitesses de déplacement très faibles, dans certaines applications où l'on est en présence de raclage d'une surface sur l'autre, quand les températures sont très élevées.

2.3. Régimes de lubrification

2.3.1. Lubrification hydrostatique

La lubrification entre des surfaces est dite hydrostatique lorsque la pression et un film fluide sont maintenus par l'intermédiaire d'une pompe externe. L'avantage est que le film est maintenu même lorsque les surfaces sont immobiles (Brunetière, 2016).

2.3.2. Lubrification hydrodynamique

En lubrification hydrodynamique, les surfaces sont séparées par un film de fluide visqueux dont la pression est générée par le mouvement relatif des surfaces qui forment un espace convergent. La lubrification hydrodynamique est utilisée (principalement) pour réduire le frottement dans les guidages d'arbre. On trouve deux types de guidages présentés sur la figure 2.1 : les paliers hydrodynamiques pour les charges radiales et les butées hydrodynamiques pour les charges axiales (Brunetière, 2016).

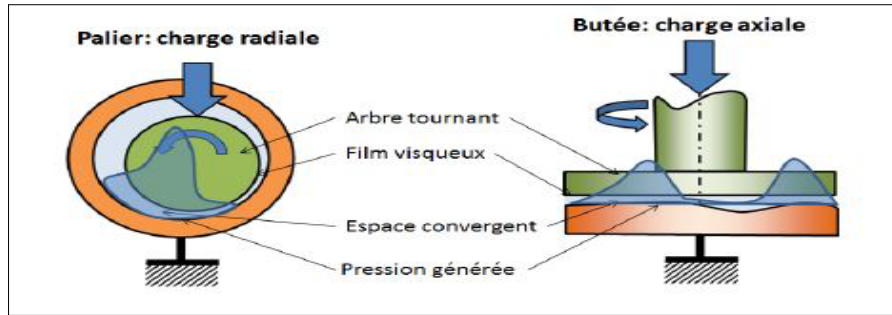


Figure 2.1 : Les deux systèmes de guidages d'arbre (Brunetière, 2016).

2.3.3. Lubrification elasto-hydrodynamique

On parle de lubrification elasto-hydrodynamique (EHD) lorsque les surfaces sont séparées par un film de fluide visqueux dont la pression est générée par le mouvement relatif des surfaces qui se déforment élastiquement sous l'effet de la pression (figure 2.2). La lubrification EHD se produit principalement dans les contacts de faible étendue où les pressions peuvent atteindre le Giga Pascal (Brunetière, 2016).

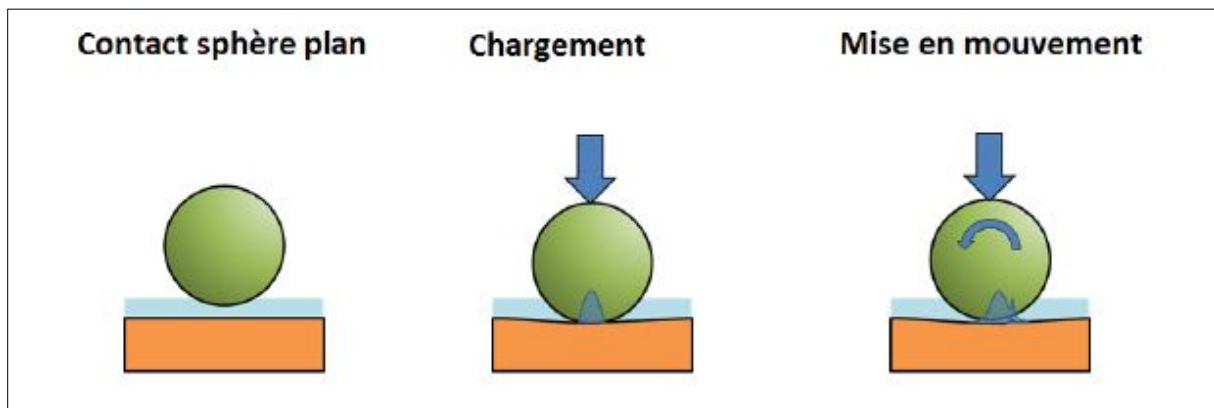


Figure 2.2: Principe de la lubrification élasto-hydrodynamique (Brunetière, 2016).

2.3.4. Lubrification mixte

La transition entre les régimes de lubrification hydrodynamique / élasto-hydrodynamique et limite est une zone grise appelée lubrification mixte dans laquelle deux mécanismes de lubrification peuvent fonctionner. Il peut y avoir des contacts solides plus fréquents, mais au moins une partie de la surface d'appui reste supportée par un film hydrodynamique partiel. Le régime mixte est également parfois appelé lubrification quasi-hydrodynamique, fluide partielle ou couche mince (typiquement de 0,025 à 2,5 μm) (Bhushan, 2013).

2.3.5. Lubrification limite

La lubrification limite est la condition dans laquelle les surfaces solides sont si proches les unes des autres que les interactions superficielles entre les films de lubrifiants

monomoléculaires ou multimoléculaires (liquides ou gazeux) et les aspérités solides dominent le contact. (Il ne s'applique pas aux lubrifiants solides)(Bhushan, 2013).

2.4. Fabrication des huiles lubrifiantes

Toutes les huiles lubrifiantes sont constituées d'un composant principal appelé « base », auquel sont ajoutés des additifs qui confèrent au lubrifiant les propriétés spécifiques requises pour une application donnée (Wauquier, 1994).

2.4.1. Les bases

Les bases pour lubrifiants peuvent être minérales (d'origine pétrolière) ou synthétiques :

a. Fabrication des huiles minérales

- **Les bases minérales conventionnelles** (Audibet, 2003)

La fraction huile est obtenue et séparée en coupes au niveau de la colonne de distillation sous vide, qui est alimentée par le résidu de la colonne « atmosphérique ». L'huile présente dans la fraction résiduaire est obtenue par un désasphaltage au propane pour donner le *bright stock*, qui correspond à la fraction d'huile la plus visqueuse récupérable. Les distillats sous vide et le *bright stock* ainsi obtenus ne peuvent convenir en l'état et doivent subir les traitements suivants :

- Afin de diminuer la variation de viscosité de l'huile avec la température, on procède à une extraction partielle des structures aromatiques par un solvant : phénol, furfurool, ou encore la méthyl-2-pyrrolidone. Ce traitement permet d'augmenter l'indice de viscosité de l'huile au niveau 95-105, partant de valeurs qui peuvent être nettement plus basses et inférieures à 50 pour des distillats sous vide de distillation directe.
- Les structures paraffiniques à longues chaînes étant responsables de points d'écoulement trop élevés, on procède à l'élimination de celles-ci soit par l'opération de déparaffinage, soit par un traitement catalytique qui a pour but de craquer les molécules soit par hydro-isomérisation de ces structures ;
- Les caractéristiques viscosimétriques et de points d'écoulement étant acquises, un traitement de finition est généralement appliqué mettant en œuvre une hydrogénation catalytique douce.

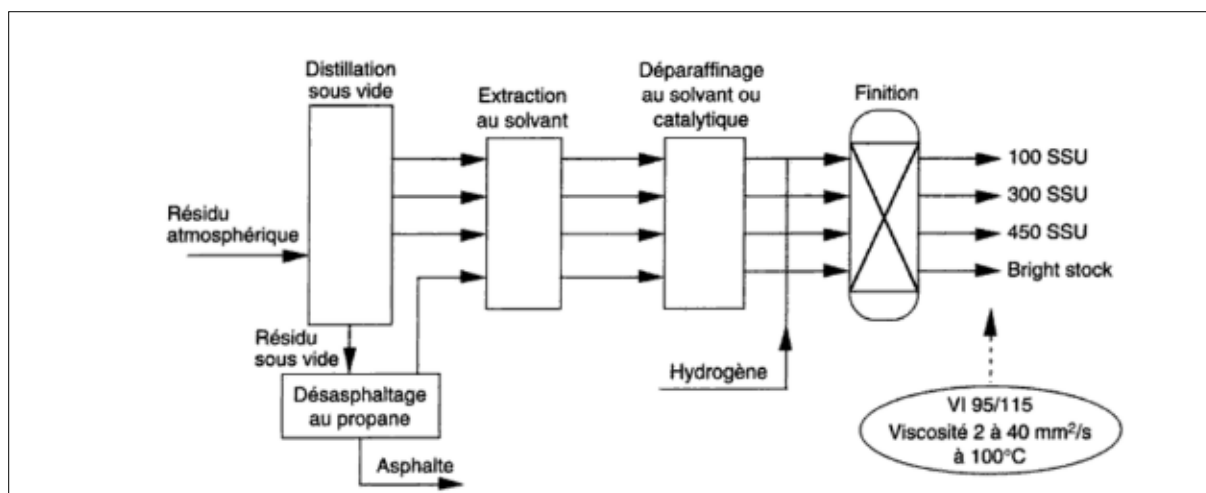


Figure 2.3: Schéma de fabrication des huiles minérales industrielles de base conventionnelles (Audibet, 2003)

- **Les bases minérales non conventionnelles** (Audibet, 2003)

On désigne par non-conventionnelles les huiles minérales obtenues par hydrotraitement en substitution du procédé d'extraction au solvant. Un avantage immédiat résulte de l'amélioration du rendement en huile puisque l'hydrotraitement permet d'obtenir les propriétés viscométriques recherchées (indice de viscosité supérieur à 95 et pouvant atteindre 130 à 140) par la transformation partielle des molécules, sans que l'on ait à extraire une fraction du produit. Les réactions mises en jeu pour augmenter l'indice de viscosité consistent à s'orienter vers des structures moléculaires en chaînes, par ouverture de cycles et hydrogénation partielle des aromatiques, contenant en moyenne un cycle monoaromatique ou mononaphténique par molécule. L'objectif est d'obtenir un bon indice de viscosité avec (VI) avec le minimum de longues chaînes paraffinées qui sont éliminées au niveau du déparaffinage.

L'hydrotraitement permet, par ailleurs, de réduire fortement la teneur en soufre et en azote qui sont éliminés sous forme H_2S et de NH_3 . La figure 2.4 représente un schéma de production d'huile par hydrotraitement :

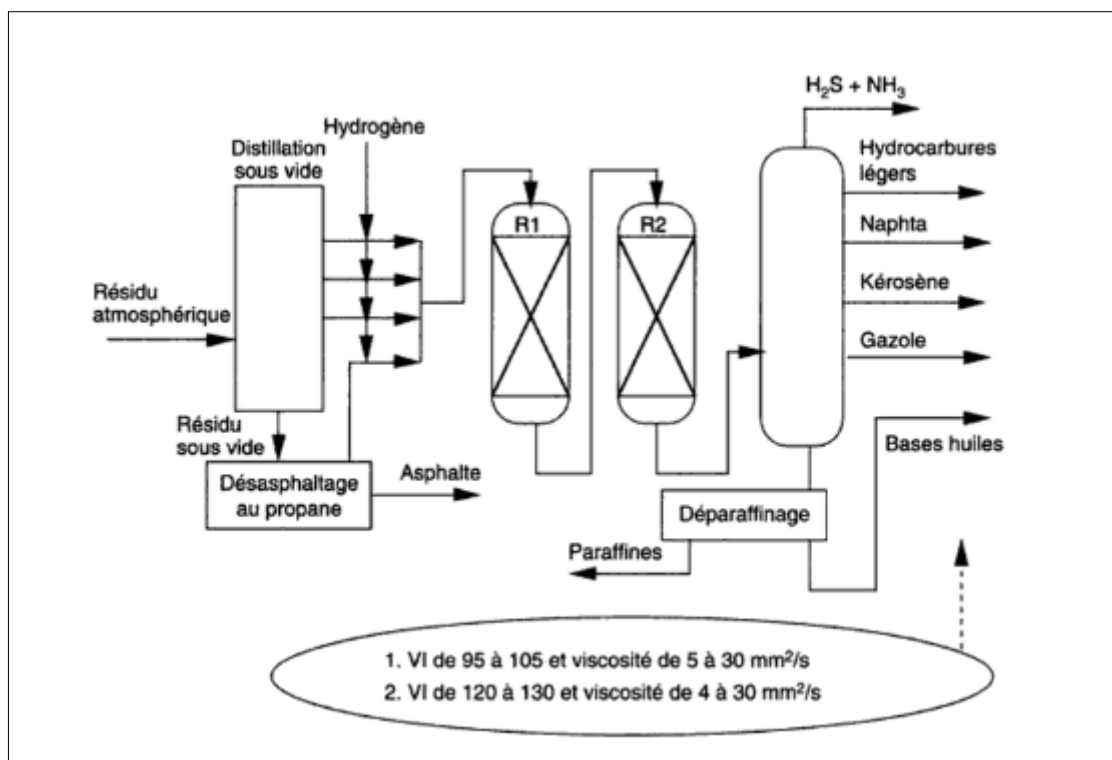


Figure 2.4: Schéma de fabrication des huiles de base non conventionnelles (Audibret, 2003)

b. les bases synthétiques

Elles sont obtenues par synthèse chimique (addition d'un produit sur lui-même ou polymérisation ou addition d'un produit sur un autre comme l'estérification, l'alkylation, etc.) de composants provenant de la pétrochimie, la carbochimie, la lipochimie (ou chimie des corps gras) et de la chimie minérale tels que : oléfines, aromatiques, alcools, acides, composés halogénés, phosphorés, silicés, etc. (Ayel et Born, 1998).

Les bases synthétiques sont de plusieurs sortes (Wauquier, 1994):

- Les polymères d'oléfines : polyalphaoléfines (PAO), polybutène et les alkylaromatiques, en particulier les dialkylbenzènes (DAB).
- Les polyesters organiques, obtenus soit à partir d'un diacide et d'un monoalcool, soit à partir de polycols et d'un monoacide, soit encore à partir de diols et diacide.
- Les polyalkylènes glycols, en particulier les polypropylènes glycols.
- Les esters phosphoriques, peu répandus comme bases, mais qui servent comme additifs.
- Des produits spéciaux : silicones, silicates, polyphényléthers, peu utilisés, et pour des applications très ciblées, car ils sont onéreux.

2.4.2. Les additifs (Audibet, 2003)

Les additifs jouent un rôle considérable dans l'observation de la qualité de l'huile finie. Ceci aide à comprendre que les légères différences de qualité éventuellement observées entre des huiles de base minérales, qu'elles soient vierges ou régénérées s'estompent devant le rôle joué par les additifs dont les différentes fonctions sont décrites ci-après.

a. Les additifs antioxydants

Sans protection, une huile de base, aussi raffinée soit-elle, subirait une oxydation rapide au cours de son utilisation, entraînant une augmentation de sa viscosité, la formation de produits oxydes corrosifs et de dépôts et vernis. Plus précisément, la vitesse d'oxydation d'un hydrocarbure double tous les 10°C. Pour protéger l'huile contre oxydation, et donc augmenter sa durée d'utilisation, on peut lui incorporer les additifs suivants :

- Soit des antioxydants inhibiteurs radicalaires qui agissent sur l'étape de propagation de l'oxydation par neutralisation des radicaux libres. Ce sont des composés phénoliques, phénates et salicylates d'alcalino-terreux et amines aromatiques.
- Soit antioxydants destructeurs d'hydroperoxydes susceptibles d'induire de nouvelles chaînes d'oxydation. On distingue les additifs sans cendres à action stœchiométrique (composées soufrés organiques) et les additifs avec cendres à action catalytique (dialkyldithiophosphate ou carbamate de zinc).

b. Les additifs détergents

Le rôle des additifs détergents est de prévenir les dépôts à chaud sur les surfaces et de maintenir propres les circuits de distribution du lubrifiant. Ces additifs peuvent recevoir une « réserve alcaline » par incorporation des carbonates de calcium ou de magnésium colloïdaux. Ces additifs sont des sels de calcium ou de magnésium d'acides organiques. Les plus courants sont les sulfonâtes « naturels » ou « synthétiques » caractérisés par des poids moléculaires élevés pour leur conférer un caractère oléophile suffisant dans le milieu huile. Les premiers sont notamment obtenus comme sous-produits de la fabrication des huiles blanches et les seconds sont fabriqués à partir d'alkylats aromatiques par des oléfines lourdes. Une deuxième famille très utilisée est constituée par les phénates dans lesquels la lettre « M » représente l'élément calcium, ou magnésium.

c. Les additifs dispersants sans cendres

Les additifs dispersants sont apparus ensuite devant la nécessité de renforcer le maintien en suspension fine des matières susceptibles de se déposer les circuits de graissage .Cette

propriété fut améliorée grâce au développement d'additifs dits « sans cendres » dont les premiers proposés sur le marché furent les alkénylsuccinimides, composés tensioactifs dont la partie oléophile est constituée d'un radical polybutène de masse moléculaire de 800 à 1500 environ. La partie polaire, souvent azotée, se fixe sur les particules et les stabilise dans le milieu (poussières, eau, suies, métaux d'usure, résidus solides d'oxydation). D'autres molécules d'additifs dispersants sans cendres, comprenant le même radical oléophile, sont également commercialisées comme les bases de Mannich ou les esters succiniques.

d. Les additifs anti usure

Lorsque la pression croît entre des surfaces en mouvement, il y a risque de rupture du film d'huile et donc de détérioration rapide des surfaces. Pour pallier cet inconvénient, on incorpore à l'huile des additifs qui ont la propriété de s'adsorber sur les surfaces en contact et en quelque sorte de former un film protecteur solide. Ces additifs sont :

- Soit des composés organiques polaires de type alcools, amines grasses, acides, avec risque de désorption au-delà de 150°C.
- Soit des composés organiques à base de soufre, de phosphore, de chlore, d'azote, d'oxygène, de plomb ou de zinc.

Lorsque la charge sur les surfaces augmente, on doit utiliser des additifs extrême-pression parmi lesquels on peut citer les composés soufrés agissant sous forme d'un film lubrifiant de sulfure métallique inorganique.

e. Les additifs améliorant l'indice de viscosité

L'additif améliorant l'indice de viscosité fait, par exemple, passer l'huile quasi monograde 15W20, au grade 15W40 ou 15W50 par élévation sélective de la viscosité à chaud. Les additifs utilisés sont soit des polyméthacrylates d'alkyles (assez coûteux), soit, plus généralement, des copolymères d'oléfines ou des copolymères de type diène/styrène hydrogénés.

f. Les additifs abaisseurs de point d'écoulement

L'action de ces additifs consiste à entraver le processus de croissance des cristaux de paraffines qui se forment dans l'huile aux basses températures. On utilise des polyméthacrylates de faible masse moléculaire. En fait, l'action recherchée est aussi exercée par certains additifs améliorant l'indice de viscosité.

g. Les additifs antirouille et anticorrosion

Ces additifs sont des inhibiteurs soit oxygénés soit azotés :

- Les inhibiteurs oxygénés sont essentiellement des acides carboxyliques à longue chaîne organique.
- Les inhibiteurs azotés sont essentiellement des amines grasses et leurs dérivés
- Les additifs détergents et dispersants ont aussi des propriétés antirouille.

La rouille est due à l'action combinée de l'eau et de l'oxygène de l'air sur le fer. Il y a formation d'hydroxyde ferreux puis ferrique. La corrosion est donc spécifiquement à l'action de l'acidité de composés soufrés et d'acides résultant de l'oxydation de l'huile ou du carburant.

h. Les additifs antimousses

Pour diminuer la tendance au moussage de l'huile, due, pour une part, à la présence des additifs détergents, on ajoute de très faibles quantités d'additif antimousse, on utilise des produits à base de silicone ou de polyméthacrylates d'alkyle de faibles poids moléculaires qui sont insolubles dans l'huile et viennent se concentrer à l'interface liquide/air. Leur faible tension superficielle s'oppose à la formation de mousse stable par coalescence rapide des bulles d'air.

2.5. Classification des huiles lubrifiantes

Les lubrifiants sont classés par des organismes nationaux et internationaux :

2.5.1. Le système ASTM D 2422

C'est un système assez peu connu et qui a servi à celui plus récent de l'ISO indiqué plus loin ; il est applicable à tous les fluides tirés du pétrole ou d'autres origines qui peuvent être facilement mélangés pour produire des lubrifiants fluides d'une viscosité désirée (Association française des techniciens du pétrole, 1974). Les grades de viscosité sont donnés dans le tableau 2.1 :

Tableau 2.1: Classification ASTM de viscosité des lubrifiants industriels (ASTM d 2422) (Association française des techniciens du pétrole, 1974).

Nombre de viscosité ASTM Valeurs nominales à 37,8°C			Variation de la viscosité absolue à 37,8°C des nombres de viscosité ASTM (Centistokes)	
Centistokes (1)	Secondes Saybolt Universel SSU	Équivalence approx. en °Engler (2)	Min.	Max.
2	32	1,14	1,98	2,42
3	36	1,22	2,88	3,52
5	40	1,40	4,14	5,06
7	50	1,56	6,12	7,48
10	60	1,83	9,00	11,00
15	75	2,32	13,50	16,50
22	105	3,10	19,80	24,20
32	150	4,32	28,80	35,20
46	215	6,1	41,40	50,60
68	315	8,9	61,20	74,80
100	465	13,1	90,00	110,00
150	700	19,7	135,00	165,00
220	1000	29,0	198,00	242,00
320	1500	42,0	288,00	352,00
460	2150	60,0	414,00	506,00
680	3150	89,0	612,00	748,00
1000	4650	131,0	900,00	1100,00
1500	7000	197,0	1350,00	1650,00

2.5.2. Le système ISO

La classification définit 20 grades de viscosité compris entre 2 centistokes et 3200 centistokes à 40°C, au lieu de 37,8 °C pour le système ASTM, les grades de viscosité sont données dans le tableau 2.2 :

Tableau 2.2: Classification de viscosité iso des lubrifiants liquides industriels
(AyeletBorn.1998)

Grade de viscosité ISO	Point moyen de viscosité (cSt à 40,0°C)	Limite de viscosité cinématique (cSt à 40,0°C)	
		Minimum	Maximum
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10,0	9,00	11,00
ISO VG 15	15,0	13,50	16,50
ISO VG 22	22,0	19,80	24,20
ISO VG 32	32,0	28,80	35,20
ISO VG 46	46,0	41,40	50,60
ISO VG 68	68,0	61,20	74,80
ISO VG 100	100,0	90,00	110,00
ISO VG 150	150,0	135,00	165,00
ISO VG 220	220,0	198,00	242,00
ISO VG 320	320,0	288,00	352,00
ISO VG 460	460,0	414,00	506,00
ISO VG 680	680,0	612,00	748,00
ISO VG 1000	1000,0	900,00	1100,00
ISO VG 1500	1500,0	1350,00	1650,00
ISO VG 2200	2200,00	1980,00	2420,00
ISO VG 3200	3200,00	2880,00	3520,00

2.5.3. Les systèmes SAE (Giroud, 2014)

Le besoin d'un système de classification simple pour les huiles moteur au niveau international à fait naître la "Society of Automotive Engineers" ou SAE qui a élaboré un système qui porte son nom. Ce système définit uniquement des catégories de viscosité.

On distingue deux catégories, les « huiles d'été », indiquées par les chiffres SAE 20, 30, 40 et 50 et les « huiles d'hiver » indiquées par SAE 0W, 5W, 10W, 15W, 20W et 25W.

Chapitre 2 : Généralité sur les lubrifiants

Ces derniers se réfèrent surtout à des limites inférieures permettant un démarrage à froid.

Le tableau 2.3 donne un résumé des limites de viscosité aux températures considérées. Attention : les huiles d'été sont toujours mesurées à 100°C, les huiles d'hiver à des températures plus basses.

Tableau 02.3: Classification SAE des huiles moteurs (DECEMBRE 99) (Castrol, 2006)

Classe de viscosité SAE	Viscosité maximale en mPa.s à la température indiquée (°C)		Viscosité à 100°C en mm ² /s		Viscosité à haute température (150°C) pour un taux de cisaillement de 10 ⁶ s ⁻¹ en mPa.s min.
	Mise en démarrage	Pompabilité	Min.	Max.	
W	6200 à -35	60000 à -40	3,8	-	-
5W	6600 à -30	60000 à -35	3,8	-	-
10W	7000 à -25	60000 à -30	4,1	-	-
15W	7000 à -20	60000 à -25	5,6	-	-
20W	9500 à -15	60000 à -20	5,6	-	-
25W	13000 à -10	60000 à -15	9,3	-	-
20	-	-	5,6	≤ à 9,3	2,6
30	-	-	9,3	≤ à 12,5	2,9
40	-	-	12,5	≤ à 16,3	2,9
40	-	-	12,5	≤ à 16,3	(0W-40,5W-40,10W-40) 3,7 (15W-40,20W-40,25W,40)
50	-	-	16,3	≤ à 21,9	3,7
60	-	-	21,9	≤ à 26,1	3,7

2.6. Propriétés des huiles

2.6.1. Propriétés massiques

a. Masse volumique

La masse volumique est définie comme le quotient de la masse d'un corps par son volume, elle s'exprime en kg/cm³. Pour les produits pétroliers, elle est généralement donnée à 15°C (Denis, 1997).

b. La densité

La densité d'une substance est le rapport de masse volumique à la masse volumique d'un corps de référence dans des conditions qui doivent être spécifiques pour les deux corps. En général, les corps de référence sont l'eau pour les liquides et l'air pour les gaz (Denis, 1997).

Habituellement, la masse volumique est prise à 20°C pour le corps étudié et à 4°C pour l'eau.

On désigne alors la densité d_4^{20} (Denis, 1997).

2.6.2. Propriétés optiques

a. La couleur

C'est par transparence que l'on évalue la couleur d'une huile en la comparant à celles de verres étalons. La couleur d'une huile de base est d'autant plus claire qu'elle est mieux raffinée mais les additifs assombrissent pratiquement toujours les huiles de base. Certains même les noircissent complètement (graphite, bisulfure de molybdène, etc.) (Ayel et Born, 1998).

b. L'indice de réfraction

L'indice de réfraction est défini par le rapport des vitesses de transmission d'une radiation lumineuse dans le vide et dans un milieu transparent considéré. C'est un nombre sans dimension, caractéristique d'un milieu donné (Denis, 1997).

2.6.3. Propriétés électriques

a. Résistivité électrique

La résistivité d'un corps peut se définir comme la résistance d'un cube de côté unité entre deux faces opposées sur lesquelles sont appliquées des électrodes métalliques (Denis, 1997).

b. Rigidité électrique

La rigidité électrique correspond à la tension minimale à appliquer pour percer une certaine épaisseur d'isolant par un arc électrique généré entre deux électrodes métalliques (Denis, 1997).

2.6.4. Propriétés thermiques

a. Capacité thermique massique

La capacité thermique massique plus connue sous la dénomination triviale de « chaleur massique », est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à une unité de masse de ce corps pour élever sa température de un degré. La capacité thermique massique s'exprime en $J.Kg^{-1}.K^{-1}$ (Denis, 1997).

b. Point d'écoulement

Il s'agit de la température la plus basse à laquelle l'huile coule encore lorsqu'elle est refroidie, sans agitation, dans des conditions normalisées. Le point d'écoulement des bases paraffiniques est lié à la cristallisation des n-paraffines. Celui des bases naphthéniques est lié à une augmentation importante de la viscosité aux basses températures. Cette propriété peut être améliorée par des additifs (Wauquier, 1994).

c. Point d'aniline

Cette valeur caractérise la teneur en aromatiques des huiles non formulées : le point d'aniline est d'autant plus élevé que cette teneur est faible (Wauquier, 1994).

d. Point d'éclair

Ce point renseigne sur l'inflammabilité à savoir la capacité du lubrifiant à libérer des vapeurs inflammables. Il correspond donc à la température à laquelle il faut porter un lubrifiant pour que ces vapeurs s'enflamment au contact d'une flamme ou d'une étincelle (Ligier, 1997).

e. Point de feu

Lorsqu'on dépasse le point éclair et que l'on continue à chauffer le lubrifiant, on peut atteindre ce que l'on appelle le point de feu. Celui-ci est obtenu lorsque la combustion des vapeurs persiste pendant au moins 5 secondes (Ligier, 1997).

f. Point d'auto-inflammation

Pour une température suffisamment élevée, le lubrifiant est susceptible, en présence d'air, de s'enflammer en l'absence de flamme ou d'étincelle (Ligier, 1997).

2.6.5. Propriétés rhéologiques

a. La viscosité

Il s'agit de la caractéristique essentielle de tout lubrifiant. On mesure le plus souvent la viscosité cinématique, en chronométrant le temps d'écoulement de l'huile dans un tube capillaire calibré. La viscosité varie avec la pression mais l'incidence de la température est plus forte : la viscosité diminue rapidement avec l'augmentation de la température (Ligier, 1997).

b. L'indice de viscosité

Il s'agit d'un nombre qui est le résultat d'un calcul faisant intervenir la viscosité à 40°C et celle à 100°C, et qui caractérise la capacité du lubrifiant à conserver constante sa viscosité dans une large gamme de températures. Cette propriété peut être améliorée par des additifs (Ligier, 1997).

c. Compressibilité

Les huiles non aérées sont très peu compressibles, aux faibles pressions on peut considérer l'huile comme un fluide incompressible, cependant sous hautes pressions, sa compressibilité devient non négligeable à cause de l'air dissous qu'elle renferme (Ayel et Born, 1998).

2.6.6. Propriétés chimiques

a. Indice d'acidité totale

L'indice d'acidité appelé encore *AcidNumber* (AN) et anciennement *Total AcidNumber* (TAN) est, par définition, le nombre de milligrammes de potasse nécessaire à la neutralisation des acides organiques ou minéraux contenus dans un gramme d'huile. L'huile de base de type hydrocarbure (bases minérales classiques, bases hydrotraitées, PAO...) ne doivent présenter aucune acidité à l'état neuf (Ayel et Born, 1998).

b. Indice de basicité totale

La basicité d'une huile renfermant des additifs alcalins ou alcalino-terreux est caractérisée par l'indice de base ou *Base Number* (BN) anciennement désigné *Total Base Number* (TBN). L'alcalinité (ou basicité) est exprimé par le nombre de milligrammes de potasse par gramme d'huile qui aurait le même pouvoir neutralisant vis-à-vis des polluants acides (Ayel et Born, 1998).

c. Teneur en eau

La présence d'eau dans une huile de lubrification constitue une anomalie et ne peut résulter que d'une pollution. Le dosage de la teneur en eau séparée, selon la norme ASTM D95 ou l'humidité d'une huile neuve, est nécessaire pour vérifier l'état d'un produit provenant d'une fourniture ancienne, ou contenu dans un emballage stocké dans des conditions anormales. Pour un lubrifiant usagé, la recherche de la teneur en eau peut apporter des indications utiles (Ayel et Born, 1998) :

- Sur l'état de l'huile (inadaptées, usées,...) ;

- Sur l'état de la machine (mauvaise conception, fuite) ;
- Sur l'agression de l'environnement (pollution extérieure).

Une teneur en eau très élevée est un sérieux signal d'alerte avant une prochaine défaillance du mécanisme concerné.

d. Teneur en métaux

La détermination de la teneur en métaux d'usure contenus dans les lubrifiants en service permet de contrôler soit l'état de pollution de l'huile en vue d'une vidange éventuelle, soit l'usure du mécanisme. Les principaux métaux dosés sont le fer, l'aluminium, le cuivre, le plomb, l'étain, le nickel, le chrome, le molybdène, le zinc, le magnésium, le titane, l'antimoine, l'indium et l'argent, selon la norme ASTM D6595 (Ayel et Born, 1998).

Le dosage d'éléments tels que le silicium, le sodium, le bore, etc., permet, par comparaison avec leurs teneurs dans les huiles neuves, de détecter une éventuelle pollution extérieure : le silicium indique l'introduction de poussières atmosphériques.

e. Teneur en eau et en sédiment (BSW)

Cette méthode consiste à mesurer les teneurs en eau et en sédiments présents dans l'huile sous forme émulsionnées et provenant de la contamination extérieure. Le principe est basé sur la centrifugation d'un volume de toluène afin de favoriser l'entraînement à une vitesse de rotation pendant un certain temps, selon la norme ASTM D1796 (Ayel et Born, 1998).

f. Teneur en insolubles

Les diverses pollutions et dégradations (thermique et chimique) des lubrifiants en service ou lors d'essais conduisent à la formation et à l'accumulation de produits insolubles tels que suies de combustion, poussières, débris d'usure, produits d'oxydation et d'hydrolyse. Ceux-ci sont quantifiés, selon leur nature, par différentes techniques (Ayel, 1996).

g. Teneur en carbone résiduel

Le pourcentage de carbone transformé en coke, appelé *Résidu de Carbone Conradson* (CCR) est une caractéristique intéressant principalement les huiles compresseurs et les fluides caloporteurs mais qui sert aussi à qualifier les huiles de base (Ayel, 1996).

Chapitre 3 :

Les huiles en

service

Chapitre 3 : Les huiles en service

3. Les huiles en service

3.1. Contamination des huiles lubrifiantes en service

3.1.1. Contamination solide

Les particules solides qui peuvent contaminer le lubrifiant peuvent avoir cinq origines principales (Ville, 1998) :








- Présente dans une huile neuve ;
- Due à la fabrication. Lors des usinages, il arrive que des copeaux ou encore des particules issus des outils coupants ou des meules de rectification restent dans le mécanisme ;
- Générée. Lors du fonctionnement du dispositif, des particules d'usure se forment à partir des composants en mouvement. Il peut y avoir également de la pollution due à l'oxydation et à la décomposition du lubrifiant ;
- Ingérée de l'environnement. Cela provient d'une étanchéité insuffisante, des filtres qui n'éliminent pas toutes les particules (des filtres de taille absolue 40 µm sont utilisés dans l'automobile) ou encore de l'ouverture des réservoirs ;
- Ingérée lors des opérations de maintenance. Cela se produit lors des démontages et remontages des pièces ou lors des pleins et appoints en lubrifiants.

La présence de polluants solides dans le lubrifiant ou sur les parois peut causer des dommages extrêmement importants au mécanisme qu'il doit lubrifier (Denis,1997):

- Polissage, rayures, abrasion provoquant une usure importante, grippage ;
- Dépôt, colmatage des circuits de lubrification ;
- Augmentation de la viscosité du lubrifiant, formation de gels d'où une circulation défectueuse de l'huile et une mauvaise lubrification.

Les contaminants solides peuvent avoir différentes formes, ils peuvent être classés en sept familles. Cette classification basée essentiellement sur la forme des particules et permet de déterminer leurs origines. Le tableau 3.1 donne la forme et l'origine des polluants ou les contaminants solides (Hunt, 1993):

Tableau 3.1: Classification des particules selon la forme selon Hunt (Hunt, 1993)

Forme	Schémas	Origine
Sphères		Agglomération et fusion de débris métallique d'usure.
Ovoïdes déformés lisses (galets)		Poussières issues de l'extérieur
Gros morceaux et pavés		Particules métallique produites par la fatigue des surfaces
Plaquettes et écailles		Particules métalliques produites lors du rodage ou d'une usure dite anormale
Boucles, copeaux et lamelles		Particules produite lors de l'usinage ou par labourage de la surface
Rouleaux		Particules étant à la fois des copeaux et des écailles
Brins et fibres		Particules non métalliques en général issues d'une atmosphère polluée

Les contaminants solides peuvent avoir différentes origines, le tableau 3.2 donne la source des différents contaminants solides qui peuvent être présents dans les huiles en service.

Tableau 3.2: Les contaminants solides (Total lubrifiants, 2010)

Élément	Élément d'usure	Polluant	Additif	Commentaires
Aluminium (Al)	Usure et corrosion de pièces en alliage léger.	Poussières atmosphériques. Usinage.	Savons de certaines graisses	Élément présent dans certaines argiles sous forme d'alumine
Argent (Ag)	Usure du revêtement de certaines pompes hydrauliques.	-	-	Très rarement rencontré
Bore (B)	-	Inhibiteurs de corrosion des fluides aqueux.	Additifs EP (Borates).	Présent aussi dans les huiles moteurs (additifs dispersants).
Calcium (Ca)	-	Poussières atmosphériques. Calcaire.	Additifs détergents. Savons de graisse.	Polluant très fréquent en cimenteries.
Chrome (Cr)	Usure de pièces chromées.	-	-	Souvent allié au Nickel ou au Vanadium.
Cuivre (Cu)	Usure et corrosion des métaux cuivreux (Bronze, Laiton,...)	Canalisations d'eau (réfrigérants ...)	Charge de graisses antigrippantes ou conductrices.	-
Étain (Sn)	Usure et corrosion de pièces étamées.	Soudure à l'étain. Bidons étamés	-	-
Fer (Fe)	Usure et corrosion des fontes et aciers.	-	-	-
Magnésium (Mg)	Usure et corrosion des alliages légers au magnésium.	Usinage	Additifs détergents	Présent aussi dans les huiles moteurs (additifs détergents).
Molybdène (Mo)	Usure et corrosion d'aciers alliés au Cr-Mo	-	Additives solides: MoS ₂ . Additives antiusure	-
Nickel (Ni)	Usure et corrosion d'aciers alliés.	Impuretés des fuels lourds.	-	Associé au Vanadium dans le cas de fuels lourds
Phosphore (P)	Usure et corrosion de bronzes et de fontes.	-	Additifs antiusure ou Extrême-Pression	-
Plomb (Pb)	Usure et corrosion de matériaux antifriction.	Super carburant. Peintures.	Savons, additifs anti usure ou Extrême, Pression, Charge solide	-
Silicium (Si)	-	Poussières atmosphériques. Fluides siliconés.	Épaississant de graisses. Additifs anti-mousse	Très abrasif lorsqu'il est présent sous forme solide : Silicates...
Sodium (Na)	-	Sel (NaCl). Eau de mer	Savons de graisses. Emulgateurs, inhibiteurs de corrosion.	Présent dans les fluides de refroidissement et dans les fuels lourds.
Zinc (Zn)	Usure et corrosion de pièces galvanisées	Peintures.	Additifs antiusure (DTPZn) ou Charge métallique	-

3.1.2. Contamination liquide (eau)

La présence d'eau dans un lubrifiant peut entraîner plusieurs effets, dont la corrosion des métaux ou l'hydrolyse de certains additifs, dont les additifs antiusure. Cette contamination provient en majorité de la condensation de l'humidité présente dans l'air ambiant lors du refroidissement du système lubrifié ou d'une entrée d'eau accidentelle dans le système lubrifié. La quantité nécessaire peut être très faible : moins de 0,1 % en masse et son effet très rapide. Le premier mode d'entrée de l'eau est dû à la « respiration » du système lubrifié. En effet, lors du fonctionnement, le système chauffe le lubrifiant et l'air contenu qui augmente alors de volume. Puis, lors de l'arrêt, le système se refroidit et aspire, suite à la rétraction du lubrifiant et de l'air contenu, de l'air extérieur chargé d'humidité. Cette dernière va ensuite se condenser sur les parties froides du système lubrifié. Ce phénomène est d'autant plus sensible que les volumes de lubrifiant et d'air contenu sont grands, et que l'écart de température est important (Giram, 2000).

- **La forme de l'eau dans l'huile**

Il existe trois formes ou états dans lesquels l'eau est trouvée lorsqu'elle est combinée avec de l'huile (Garvey et Foge, 1996)

- L'eau peut être dissoute dans l'huile en ce sens qu'elle est hydratée, dissoute ou mise à réagir avec des additifs mélangés à l'huile.
- Dans un autre état, l'huile peut être dispersée ou émulsifiée avec l'huile.
- Enfin, il peut être indépendamment stratifié ou mélangé sous forme de gouttelettes d'eau libre séparées de l'huile.

La présence d'eau dans les lubrifiants peut avoir des effets néfastes sur les composants du système, dont les plus importants sont :

a. Effet à court terme

- **Altération de la viscosité**

La viscosité de l'eau étant largement plus faible que celle des huiles de lubrification, un mélange huile/eau peut avoir une viscosité plus faible que celle de l'huile. Dans ce cas, une lubrification par ce mélange aboutira à des épaisseurs de film plus petites que celles obtenues avec de l'huile pure. Cela augmente la probabilité d'aboutir au contact entre les pièces en mouvement ou au contact entre ces pièces et les particules transportées dans le film, dans le cas de l'existence de particules (Harika, 2011).

- **Cavitation**

Des bulles de vapeur d'eau (ou d'air entraîné) peuvent provoquer des microspiqûres sur les surfaces d'appui au cours de l'implosion provoquée par la pression dans laquelle elles se condensent pour revenir à la phase liquide. C'est ce qu'on appelle les dommages par cavitation. De plus, la présence d'eau dans un lubrifiant peut améliorer l'entraînement de l'air dans celui-ci, ouvrant la voie à une plus grande cavitation. L'eau peut être adsorbée directement sur les surfaces métalliques hydrophiles, déplaçant la couche d'huile protectrice et même certains additifs pour lubrifiants. Cela permet une exposition directe de la surface métallique désormais non protégée à des conditions corrosives et à des particules, entraînant une usure excessive. L'eau libre est particulièrement sujette à ce genre de comportement (Eachus, 2005).

- **Altération des additifs**

Les additifs sont incorporés dans les lubrifiants pour servir d'améliorants de l'indice de viscosité, d'additifs anti-usure et extrême-pression (EP), d'inhibiteurs de corrosion, d'antioxydants et d'agents anti-mousse. L'incorporation de l'eau dans l'huile peut changer les caractéristiques de solubilisation de cette huile. Certains additifs peuvent être désolubilisés et, par conséquent, précipités par ce changement, contribuant ainsi à la formation de boues ; cet épuisement physique les rend également indisponibles pour fonctionner efficacement dans le lubrifiant. D'autres additifs peuvent préférentiellement être solubilisés par l'eau et éliminés par lavage. L'eau peut réagir avec certains additifs, non seulement en les rendant chimiquement indisponibles, mais également en les transformant en substances nocives telles que les acides ou davantage de boues. Par exemple, certains additifs sulfurés peuvent être hydrolysés et être transformés en produits acides tels que l'hydrogène sulfuré ou l'acide sulfurique, conduisant à l'attaque chimique des surfaces de roulement (Eachus, 2005).

b. Effet à long terme

- **Rouille et corrosion**

Bien que la contamination de l'eau par les lubrifiants se traduise par la corrosion, une usure excessive et une défaillance prématurée des surfaces métalliques lubrifiées, cette destruction est provoquée de différentes façons. L'eau peut agir directement sur les surfaces métalliques et peut également nuire à l'efficacité du lubrifiant (Eachus, 2005).

- **Propagation des fissures**

La présence de l'eau à proximité des surfaces métalliques peut déclencher un phénomène nuisible à ces surfaces connu sous le nom de « Hydrogen Embrittlement » : les molécules d'eau pénètrent par capillarité dans les micro-fissures du métal, où elles seront cassées à cause de la grande pression et du contact direct avec le métal. Il en résulte des atomes d'hydrogène libres qui s'accumulent dans les fissures, augmentent davantage la pression dans ces dernières et contribuent finalement à leur propagation (Harika, 2011).

- **Oxydation de l'huile et attaque des additifs**

L'eau peut provoquer l'oxydation de l'huile ou réagir chimiquement avec certains de ses additifs produisant, dans les deux cas, des acides corrosifs qui attaquent les surfaces internes des paliers (Harika, 2011).

- **Dégradation biologique**

En outre, une concentration en eau de 500 ppm peut être suffisante pour assurer une ambiance favorable au développement de certaines bactéries qui se nourrissent des additifs et laissent des déchets acides qui vont altérer les surfaces (Harika, 2011).

3.1.3. Contamination gazeuse (par l'air)

L'air est entraîné dans l'huile lorsque celle-ci subit des turbulences ou une agitation. Cela peut se produire lorsque l'huile traverse des paliers, des accouplements, des engrenages, des pompes et des conduites de retour d'huile. L'air peut être entraîné lorsque les niveaux de liquide sont trop bas ou lorsque les joints et les tuyaux commencent à fuir. L'entraînement d'air affecte la capacité d'une huile à agir en tant que lubrifiant, ainsi que son efficacité à transmettre la pression dans les systèmes hydrauliques. (McGuire, 2015)

Selon la conception de la machine, l'application et la gravité de l'aération, il est possible de citer cinq phénomènes causés par la présence d'air dans l'huile (Wright, 2008)

a. Oxydation

L'aération expose l'huile à l'oxygène. Les bulles produisent une interface de surface élevée entre l'air et l'huile. L'interface sert de site de réaction pour que l'oxydation de l'huile commence, en particulier lorsque l'huile est chaude et humide.

b. Dégradation thermique

L'huile dégage de la chaleur par les mécanismes suivants :

- Compression adiabatique des bulles d'air (génération de chaleur localisée)

- Résistance à l'écoulement d'huile induite par l'aération dans la tuyauterie et les composants (l'énergie est convertie en chaleur)
- Perte de module en vrac (l'air rend l'huile compressible, ce qui génère de la chaleur)

Le problème de chauffage est aggravé par un refroidissement altéré. La chaleur entraîne non seulement l'oxydation de l'huile, mais également la dégradation thermique formant ainsi un vernis, des boues et des insolubles au carbone. Des additifs tels que le dialkyldithiophosphate de zinc (ZDDP) s'épuiseront aussi prématurément à cause de la chaleur.

c. Effets sur le transfert de chaleur

La mousse nuit au transfert de chaleur, ce qui dégrade la résistance du film dans les zones de friction et conduit à l'usure.

d. Alimentation en huile réduite :

De nombreux facteurs associés à la présence d'air contribuent aux problèmes d'approvisionnement en huile. Parmi ces facteurs, citons :

- Compressibilité de l'huile. L'huile aérée est difficile à pomper. C'est comme essayer de pomper contre une éponge. Le volume d'huile réellement fourni (débit d'huile) peut ne représenter qu'une fraction de ce que la pompe fournit normalement sans la condition d'aération.
- Poches d'air (Air-lock). Une huile peu dense et mousseuse peut provoquer des poches d'air perte d'amorçage de la pompe. Une huile aérée a une viscosité apparente nettement supérieure à celle de l'huile seule, ce qui aggrave le problème.
- Abaissement du niveau d'huile. La mousse élimine une partie de l'huile en phase liquide du réservoir, ce qui signifie que le niveau d'huile baisse. Cela ramène souvent le niveau d'huile en deçà de ce qui est nécessaire pour amorcer correctement les pompes.

e. Cavitation

Les bulles de vapeur subissent des expansions explosives déclenchées dans les zones de dépression puis elles implosent dans les zones de compression. Le résultat est une érosion progressive et localisée des surfaces exposées à ces implosions.

3.2. Dégradation des huiles lubrifiantes

3.2.1. Oxydation

L'oxydation d'un lubrifiant se produit en général sous les actions combinées de l'oxygène de l'air et des températures élevées. Cette oxydation entraîne une dégradation des qualités du lubrifiant et parfois un dépôt capable de gêner le fonctionnement normale des machines. (A. Boulanger, 1988).

L'oxydation a des conséquences très néfastes sur le lubrifiant lui-même et sur le circuit de graissage : (Ayel, 1996)

- Augmentation de la viscosité.
- Noircissement de l'huile.
- Odeur âcre.
- Augmentation de l'acidité de l'huile (caractérisée par l'indice d'acide ou AN : Acid Number) pouvant entraîner des corrosions de métaux réactifs (métaux cuivreux, alliages antifricition, alliages de zinc, etc.).
- Formation de dépôts (verniss polymériques d'oxydation) et de boues (sludges).

3.2.2. L'hydrolyse

Il s'agit d'une réaction chimique de l'eau qui altère la composition chimique de l'additif ou de l'huile de base. L'eau peut être responsable de la décomposition des huiles de base synthétiques à base d'esters mais peut également réagir avec les additifs comme le dialkyldithiophosphate de zinc, constituant des produits chimiques anti-usure et antioxydants (John, 2016).

3.2.3. La polymérisation

La polymérisation des composés essentiels de l'huile peut se produire lorsque l'huile est soumise à des températures élevées, et ce pendant de longues périodes. Des températures élevées peuvent amener certains des composés de l'huile à réagir entre-eux, en créant des composés de poids moléculaire élevé. Le phénomène se traduit par une augmentation considérable de la viscosité de l'huile (John, 2016).

3.3. Effets potentiels des huiles sur l'environnement et la santé humaine (Directive environnementale sur les huiles usagées et les combustibles résiduaire, 2012)

Dans le passé, maintes activités ont contribué au rejet d'huiles usagées et de combustibles résiduaire dans l'environnement : torchage, brûlage et exercices de feu, mise en décharge brute, décharges inconsidérées, déversements accidentels ou épandage sur les routes pour contrer les poussières. Le brûlage et l'utilisation de ces substances lors d'exercices de feu

peuvent entraîner l'émission d'hydrocarbures imbrûlés, de gaz acides et de métaux qui adhèrent aux particules en suspension dans l'air (particules solides et gouttelettes liquides) et finissent par se déposer sur le sol et la végétation ou dans l'eau. Lorsque des hydrocarbures sont rejetés dans l'eau, un film d'huile se forme tout d'abord à la surface puis libère des contaminants qui viennent se mélanger à la colonne d'eau et aux sédiments. Les organismes aquatiques sont diversement touchés par ces substances : certains les absorbent par contact cutané, d'autres les ingèrent en venant respirer à la surface ; parfois, la chair de poissons, de crevettes, de myes et d'autres organismes comestibles s'en trouve altérée. Le rejet direct d'huiles usagées ou de combustibles résiduels dans le sol peut introduire des contaminants dans l'environnement par des processus de volatilisation, d'adsorption aux matières organiques solides, de lessivage vers les eaux souterraines, et d'écoulement de surface vers les océans, les lacs, les rivières et les cours d'eau.

Quantité d'espèces végétales sont extrêmement sensibles aux effets toxiques des huiles, tandis que d'autres y résistent mieux.

Les effets potentiels des huiles usagées et des combustibles résiduels sur la santé humaine sont directement corrélés aux propriétés physiques de ces substances, aux types de contaminants qu'elles contiennent et à leur teneur. Les hydrocarbures hautement volatils, étant inflammables, posent un risque d'incendie ou d'explosion. Ils sont également plus susceptibles d'être inhalés par les poumons, ce qui peut provoquer une inflammation de l'arbre trachéobronchique, des saignements alvéolaires et un manque d'oxygène. L'inhalation répétée peut avoir des effets sur le système nerveux central et entraîner, par exemple, un état léthargique, des maux de tête ou un coma. L'ingestion d'hydrocarbures peut s'accompagner d'une irritation du tube digestif, de douleurs abdominales, de vomissements et de nausées.

Un contact cutané prolongé ou répété avec des huiles usagées peut causer des irritations et des dermatites graves, aussi devrait-on l'éviter. Les métaux lourds et d'autres contaminants présents dans les huiles lubrifiantes usagées sont également susceptibles d'être absorbés par la peau.

Il est courant de trouver des métaux lourds comme le chrome, le cuivre, le plomb, le manganèse, le nickel et le zinc dans des huiles lubrifiantes usagées. Ces métaux, qui résultent de l'usure par frottement des pièces du moteur, peuvent ajouter aux effets des déchets sur la santé humaine. Les métaux lourds tendent à s'accumuler dans l'organisme et, bien que les

Chapitre 3 : Les huiles en service

symptômes varient d'un métal à l'autre, une intoxication doit être soupçonnée en présence des symptômes suivants : douleur chronique dans les muscles, les tendons ou d'autres tissus mous; sensation générale d'inconfort, de fatigue et de malaise; pertes de mémoire et confusion; troubles gastro-intestinaux, tels que diarrhée, constipation, ballonnements, aigreurs et indigestion; étourdissements; migraines et maux de tête; troubles de la vue; dysfonctionnements du système nerveux (sensation de brûlure ou engourdissement des extrémités).

Partie 2 : Étude expérimentale

Chapitre 4 :

Analyses et

interprétations

Chapitre 4 : Analyses et interprétations

L'étude expérimentale a été faite sur trois types d'huiles lubrifiantes : FODDA 68, TORBA46 et TORBA 68 en service dans un compresseur d'air, un turbocompresseur et un turboexpander comme le montre le tableau 4.1 :

Tableau 4.1: Machines tournantes et huiles lubrifiantes utilisées

Machine tournante	Compresseur d'air PT-401-01	Turbocompresseur CD-603	Turboexpander EC-201
Type d'huile lubrifiante	FODDA 68	TORBA 46	TORBA 68

Pour déterminer le niveau de la contamination et de la dégradation des huiles en service, il est indispensable de procéder à la caractérisation des propriétés physico-chimiques de l'huile neuve et de l'huile en service. Des essais normalisés ont été effectués sur l'huile FODDA 68, TORBA 46 et TORBA 68.

Les résultats d'analyse de l'huile en service obtenus sont comparés par rapport à l'huile neuve, à la norme ASTM D6224 qui donne les marges de tolérance des propriétés physico-chimiques des huiles en service dans les compresseurs et aux spécifications de l'huile données par « NAFTEC ».

Les spécifications pour les trois types d'huile données par « NAFTEC » sont présentées dans le tableau (4.2) :

Tableau 4.2: Spécification des huiles FODDA 68, TORBA 46 et TORBA 68.

	FODDA 68	TORBA 46	TORBA 68
Masse volumique à 15°C (Kg/L)	[0,870-0,885]	[0,860-0,875]	[0,865-0,880]
Viscosité cinématique à 40°C (cSt)	[61,2-74,8]	[41,4-50,6]	[61,2-74,8]
Indice de viscosité	≥ 93	≥ 93	≥ 93
L'indiced'acide total (TAN) (mgKOH/g)	/	[0,122-0,184]	[0,122-0,184]
Point d'écoulement (°C)	≤ -9	≤ -9	≤ -9

La norme ASTM D6224 donne des marges de tolérance (les niveaux d'avertissement) des caractéristiques physicochimiques des huiles en service. Ces niveaux sont indiqués dans le tableau (4.3) :

Tableau 4.3: Caractéristiques des huiles en service étudiées d'après la norme ASTM D6224. (Annexe 2)

	Norme ASTM D6224	FODDA 68	TORBA 46	TORBA 68
Viscosité cinématique à 40°C (cSt)	±5% par rapport à l'huile neuve	[67,20-74,30]	[42,90-47,46]	[61,58-68,06]
Viscosité cinématique à 100°C (cSt)	±5% par rapport à l'huile neuve	[8,290-9,162]	[6,368-7,038]	[7,773-8,591]
Total Acid Number (TAN) (mgKOH/g)	+0,2mgKOH/g par rapport à l'huile neuve	/	0,3	/
Point d'éclair (°C)	-20 °C par rapport à huile neuve	152	/	206

4.1. Matériels et méthodes

Le mode opératoire des différents essais effectués sur les huiles neuves et les huiles en service est détaillé ci-dessous.

4.1.1. Analyses des huiles

a. Masse volumique (ASTM D4052)

La masse volumique est une propriété physique fondamentale qui peut être utilisée avec d'autres propriétés pour caractériser les fractions légères et lourdes.

La masse volumique est mesurée à l'aide d'un densimètre électronique muni d'une cellule de mesure en forme de U. L'échantillon est introduit dans la cellule de mesure et est excité ; sa fréquence est mesurée puis transformée en masse volumique et affichée sur un écran à la température de consigne (en général à 20°C).

• Mode opératoire

- Laver le tube en U avec l'essence puis allumer la pompe pour introduire l'air pour sécher la cellule.

- Attendre que l'appareil se stabilise (le flash ne clignote plus, il s'éteint) et affiche la masse volumique de l'air qui est $0,0012 \text{ g/cm}^3$ à 20°C .
- Arrêter la pompe puis remplir le tube avec l'échantillon à l'aide d'une seringue hypodermique de 2ml en évitant les bulles d'air.
- Attendre que l'appareil se stabilise à nouveau, puis lire la masse volumique de l'échantillon à 20°C .
- La conversion de masses volumiques de 20°C à 15°C est effectuée selon la table 53D conformément à l'ASTM D1250-80.

b. Viscosité à 40°C et à 100°C (ASTM D445)

La viscosité cinématique consiste à mesurer le temps nécessaire à un volume de liquide pour s'écouler par gravité à travers un viscosimètre capillaire en verre calibré, la mesure peut se faire à toute température à laquelle le liquide est Newtonien.

La viscosité cinématique (valeur mesurée) est le produit du temps (en seconde) d'écoulement mesuré entre deux repères et la constante d'étalonnage du viscosimètre.

• Mode opératoire

- L'échantillon doit être homogène et dépourvu de sédiments, dans le cas où il y a des sédiments, il faut filtrer l'échantillon.
- Remplir l'échantillon dans les creusets en cuivre jusqu'au repère circulaire.
- Placer les creusets remplis dans les tiroirs de l'équipement.
- Allumer le PC, et ouvrir le logiciel.
- Programmer la mesure à l'aide du bouton « nouveau » et identifier la position de chaque échantillon dans le tiroir et le numéro du tiroir.
- Placer le viscosimètre adéquat pour la viscosité à mesurer ($200\text{s} < \text{temps d'écoulement} < 12\text{min}$).
- Programmer les capillaires et le nettoyage.
- Après 13 min de stabilisation, la mesure commence.
- Les résultats sont stockés dans une base de données.

c. L'indice de viscosité (ASTM D2270)

L'indice de viscosité est un nombre empirique, déterminé à partir des viscosités cinématiques à 40°C et 100°C .

Le calcul précis de l'indice est indiqué dans la norme ASTM 2270. La viscosité cinématique à 40 °C (U), d'une huile dont on cherche l'indice de viscosité (IV) est comparée à celles de deux huiles de référence dont les indices de viscosité sont respectivement 0 et 100 et qui ont à 100°C la même viscosité cinématique que celle de l'huile testée.

d. L'indice d'acide total (TAN) par titrage potentiométrique (ASTM D664)

L'indice d'acide total (Total Acid Number, TAN) est la quantité de KOH, exprimée en milligrammes d'hydroxyde de potassium par gramme d'échantillon, nécessaire pour titrer un échantillon dans un solvant spécifié jusqu'au point d'équivalence (EP) qui se caractérise par un point d'inflexion dans la courbe de titrage.

Mode opératoire

- 20g de l'échantillon d'huile sont dissous dans 75 mL de solvant (20 g dans le cas où le TAN est faible, dans le cas où le TAN est élevé, il faut diminuer la prise d'essai).
- Le solvant est préparé à partir de 500 mL de toluène, de 495 mL propan-2-ol et de 5mL d'eau.
- L'huile et le solvant sont titrés par l'hydroxyde de potassium 0,1 N à l'aide d'une électrode combinée.
- Les lectures des compteurs sont tracées automatiquement par rapport aux volumes respectifs de la solution de titrage et les points d'équivalence ne sont pris qu'aux inflexions bien définies de la courbe résultante.
- Le TAN se calcule par la formule suivante (en mg KOH/g) :

$$\text{TAN} = \frac{(V_1 - V_0) * 56,1}{m} \quad (4.1)$$

V₀ : Volume en ml de KOH nécessaire pour titrer le solvant de titrage.

V₁ : Volume en ml de KOH nécessaire pour titrer la prise d'essai avec le solvant de titrage.

N_{KOH} : Normalité de la solution de KOH.

m : masse en gramme de la prise d'essai.

56,1: équivalent gramme de KOH.

e. Point d'éclair Pensky-Martens (ASTM D93)

La prise d'essai est placée dans le vase d'un appareil automatique en vase fermé et chauffée avec une vitesse de chauffe normalisée avec une augmentation constante de la température de l'échantillon et sous agitation permanente, une flamme est présentée chaque augmentation de

1°C devant une ouverture dans le couvercle du vase tout en interrompant simultanément l'agitation.

- **Mode opératoire**

- Remplir le vase avec l'échantillon jusqu'au repère indiqué sur la paroi interne du vase et placer le couvercle dans son compartiment.
- Place les deux thermomètres à l'endroit indiqué.
- Choisir le programme, identifier le numéro de l'échantillon et faire entrer les paramètres ainsi que la température présumée.
- Après validation, l'essai démarre, l'agitation et le chauffage sont mis en marche.
- Lorsque les vapeurs émises par l'échantillon s'enflamment sous l'effet d'une flamme, l'appareil affiche la température du point d'éclair en °C corrigée à la pression barométrique.

f. Point d'écoulement (ASTM D97)

Le principe de cette méthode est de déterminer la température à laquelle l'échantillon se solidifie après refroidissement dans des conditions normalisées.

- **Mode opératoire**

- Remplir le tube à essais jusqu'au trait avec l'échantillon,
- Placer le tube à essais dans le premier compartiment (bain à 0°C) de l'appareil de refroidissement et commencer à examiner le tube pour un abaissement de la température chaque 3°C, si l'échantillon coule à -6°C le tube à essais est placé dans le deuxième compartiment (bain à -17°C), si il coule à -12°C le tube à essais est placé dans le troisième compartiment (bain à -34°C), si il coule à -24°C le tube à essais est placé dans le quatrième compartiment (bain à -50°C).
- Dès que l'échantillon ne coule plus en inclinant le tube à 45° pendant 15 s, le point de congélation est atteint, et le point d'écoulement est égal au point de congélation +3°C.

g. Couleur (ASTM 1500)

Cette méthode d'essai couvre la détermination visuelle de la couleur de l'échantillon d'une grande variété de produits pétroliers tels que les huiles lubrifiantes en utilisant un colorimètre qui permet de comparer une série de disques colorés avec la couleur du produit.

- **Mode opératoire**

- Remplir le tube à essais jusqu'aux trois quarts et le placer dans le compartiment central du colorimètre.
- Placer le tube à essais remplie d'eau dans l'autre compartiment.
- Quand la couleur d'un verre étalon est identique à celle de l'échantillon, noter l'indice de couleur.
- Quand la couleur de l'échantillon est comprise entre deux couleurs successives, la couleur du disque le plus foncée est prise en ajoutant la lettre L à la valeur (Lower than).
- Noter l'indice de couleur correspondant.

Selon les indices, les verres standards ont des indices qui varient de 0,5 clair jusqu'à 8 foncé avec un pas de 0,5 (figure 4.1).

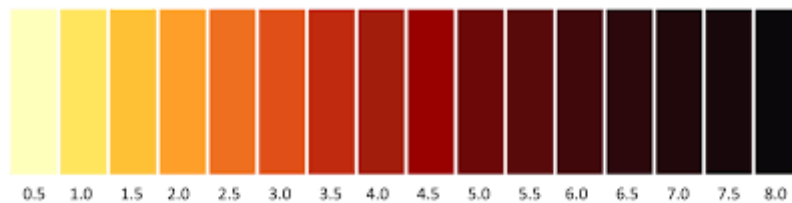


Figure 4.1:Échelle de couleur ASTM par pas de 0,5.

h. Corrosion à la lame de cuivre (ASTM D130)

Une lame de cuivre bien polie est immergée dans un volume d'échantillon spécifique, chauffée à une température et pendant une durée spécifique à la classe du produit à examiner. À la fin de l'essai, la lame est retirée, rincée ensuite elle et comparée à la tablette des lames étalons de corrosion (figure 4.2).

- **Mode opératoire**

- Prendre la lame de cuivre et commencer le polissage avec un papier verre.
- Tremper la lame dans l'acétone pour un moment.
- Reprendre la lame et poursuivre le polissage avec la poudre de carborundum à 0,105mm.
- Essuyer la lame avec du coton et tremper la dans l'acétone jusqu'à l'utilisation.
- Placer la lame polie dans un tube à essais.
- Remplir le tube avec l'huile jusqu'à recouvrir la lame.
- Plonger le tube dans un bain d'huile réglé réchauffé à 100°C et la lame plongée dans l'échantillon est maintenue dans ce bain à cette température pendant 3 heures.
- Après 3 heures retirer le tube du bain et laisser refroidir.

- Faire sortir la lame du tube et l'essuyer à l'aide de papier buvard.
- Comparer la lame avec les standards des plaques de corrosion.
- Identifier la classe de corrosion correspondant à celle de l'échantillon.



Figure 4.2:Classification des bandes de cuivre.

4.1.2. Analyse des contaminants

a. Teneur en eau et en sédiment (ASTM D 1796)

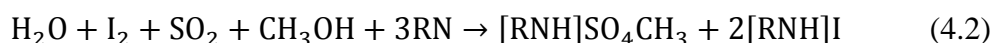
Le principe de cette méthode consiste à déterminer le volume d'eau et sédiments par centrifugation en présence d'un solvant aromatique toluène.

• Mode opératoire

- Agiter l'échantillon pour qu'il soit homogène.
- Remplir l'ampoule avec 50mL d'huile et 50mL de toluène.
- Placer deux ampoules (pour avoir l'équilibre) dans la centrifugeuse et fermer le couvercle.
- Mettre la centrifugeuse en marche pendant 30 minutes avec une vitesse de rotation de 2000t/min à une température de 60°C.
- Une fois la durée de centrifugation terminée, retirer les ampoules et lire la graduation correspondante au dépôt : eau+ sédiments, les résultats sont multipliés par deux.

b. Teneur en eau par titrage coulométrique KARL FISHER (ASTM D6304)

Le principe du titrage coulométrique selon KARL FISHER consiste à faire réagir l'eau avec l'iode et le dioxyde de soufre en présence de méthanol et d'une base selon l'équation suivante :



Une portion aliquote est injectée dans le récipient de titrage d'un appareil Karl Fischer coulométrique dans lequel l'iode pour la réaction de Karl Fisher est généré par coulométrie à l'anode. Lorsque toute l'eau a été titrée, un excès d'iode est détecté par un détecteur de point final électrométrique et le titrage est terminé. Sur la base de la stœchiométrie de la réaction, 1 mole d'iode réagit avec 1 mole d'eau ; ainsi, la quantité d'eau est proportionnelle au courant total intégré selon la loi de Faraday.

- **Mode opératoire :**

- Prendre 80 mL d'hydranal et 20 mL de chloroforme (pour permettre une meilleure solubilité de l'échantillon dans l'hydranal).
- À l'aide d'une seringue prendre de 2mL de l'échantillon ou 0,5mL quand l'échantillon est trouble.
- l'échantillon est pesé après avoir taré la seringue, une fois le poids de l'échantillon déterminé il est injecté dans l'appareil.
- Après le titrage l'appareil demande le poids de l'échantillon, on l'introduit, il calcule la teneur en eau en ppm et en % poids.

- c. **Teneur en soufre (ASTM D4294) :**

La méthode consiste à placer l'échantillon dans un faisceau émis par une source de rayons X.

L'échantillon absorbe les rayons X transmis entre la source et le détecteur, l'intensité des rayons X enregistrée est proportionnelle à la concentration en soufre (la plus haute teneur en soufre transmet moins les rayons X).

- **Mode opératoire :**

- Introduire l'échantillon d'huile dans une boîte en carton et mettre l'anneau A au-dessous de la boîte en carton.
- Couvrir la boîte en carton avec un film plastique transparent aux rayons X.
- Placer l'anneau B au-dessus de la boîte en carton et introduire l'échantillon dans la cellule de mesure.
- L'appareil de mesure est programmé pour faire trois mesures par échantillon chaque mesure qui dure 30s, la teneur en soufre c'est la moyenne des trois mesures, elle est déterminée par une courbe d'étalonnage préalablement préparée.

4.1.3. Analyse des métaux (ASTM D6595)

Cette méthode d'essai couvre la détermination des teneurs en métaux d'usures, en dopants et en polluants présentes dans les huiles lubrifiantes en service et dans les fluides hydrauliques par la méthode spectroscopie d'émission atomique à électrode de disque rotatif (RDE-AES),

elle permet de détecter et de quantifier les éléments de taille des matières dissoutes pour des particules d'environ 10 µm.

- **Mode opératoire**

- Remplir les porte-échantillons jusqu'au trait de niveau de l'huile à analyser.
- Démarrer l'analyse en appuyant sur start.
- Les métaux d'usure et les contaminants présents dans la prise d'essai d'huile usagée sont évaporés et excités par décharge en arc contrôlée utilisant la technique du disque tournant. Les énergies de rayonnement de lignes analytiques sélectionnées et une ou plusieurs références sont collectées et stockées au moyen de tubes photomultiplicateurs, de dispositifs à couplage de charge ou d'autres détecteurs appropriés. Une comparaison est faite entre les intensités émises des éléments de la prise d'essai d'huile usagée et celles mesurées avec des étalons d'étalonnage.
- Les concentrations des éléments présents dans la prise d'échantillon sont calculées et affichées.

4.2. Résultats d'analyses et interprétations

4.2.1. Huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01

a. Résultats d'analyse :

Les essais effectués sur l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air ont donné les résultats présentés dans le tableau (4.4).

Tableau 4.4: Résultats d'analyse de l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01.

Type de machine	Huile Neuve FODDA 68	Compresseur d'air PT-401-01			
		31/12/2016	07/08/2017	22/12/2017	31/08/2018
Date de prélèvement		31/12/2016	07/08/2017	22/12/2017	31/08/2018
Masse volumique à 15°C (kg/L)	0,8722	0,8726	0,8712	0,8719	0,8713
Visc. cinématique à 40°C (cSt)	70,76	70,41	71,83	72,38	73,46
Visc. cinématique à 100°C (cSt)	8,726	8,962	8,812	8,993	9,070
Indice de viscosité	94,17	100,51	94,17	97,42	95,47
Indice d'acide (TAN) (mgKOH/g)	-	-	-	0,05	0,42
Point d'éclair (°C)	172	-	210	204	206
Point d'écoulement (°C)	-9	-12	-12	-12	-9
Couleur ASTM	L2,0	L3,5	L6,5	L4,0	L6,5
Corrosion à la lame de cuivre (classe)	2e	1b	1b	3a	3b
Teneur en eau et sédiment (%V/V)	T.N.D	< 0,05	< 0,1	Nulle	T.N.D
Teneur en eau par KARL FISHER (ppm)	-	-	-	0,0	3275,4
Teneur en soufre (%poids)	0,45	0,29	0,22	0,32	0,25

Analyses et interprétations

L'analyse de la spectroscopie d'émission de l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01 a donné les résultats présentés dans le tableau (4.5) :

Tableau 4.5: Résultats d'analyse des métaux dans l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01.

Type de machine	Huile Neuve FODDA 68	Compresseur d'air PT-401-01			
		31/12/2016	07/08/2017	22/12/2017	31/08/2018
Usure (ppm)					
Fer (Fe)	0,0	0,4	2,8	1,0	4,8
Chrome (Cr)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Plomb (Pb)	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0
Cuivre (Cu)	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
Étain (Sn)	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0
Aluminium (Al)	0,8	0,2	0,0	0,0	1,5
Nickel (Ni)	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Argent (Ag)	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Molybdène (Mo)	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
Titane (Ti)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Vanadium (V)	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0
Cadmium (Cd)	0,1	-	0,1	0,0	-
Manganèse (Mn)	0,0	-	0,1	0,0	-
Antimoine (Sb)	5,3	-	0,0	0,4	-
Additifs (ppm)					
Bore (B)	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
Magnésium (Mg)	0,0	0,3	0,1	0,2	0,8
Calcium (Ca)	0,0	2,0	0,0	2,0	4,1
Zinc (Zn)	1,1	5,7	4,2	2,7	5,8
Baryum (Ba)	0,0	-	0,0	0,0	-
Phosphore (P)	140,7	-	123,4	133,6	-
Polluants (ppm)					
Silicium (Si)	0,0	2,2	0,0	5,4	6,7
Sodium (Na)	0,0	1,5	0,0	0,2	1,8
Lithium (Li)	0,0	-	0,1	0,0	-
Potassium (K)	0,0	-	0,0	0,0	-

b. Interprétation

• **Masse volumique**

La figure (4.3) présente la variation de la masse volumique à 15°C de l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01 en fonction du temps (mois), la masse volumique de l'huile neuve et les valeurs fixées par les spécifications sont prises comme référence.

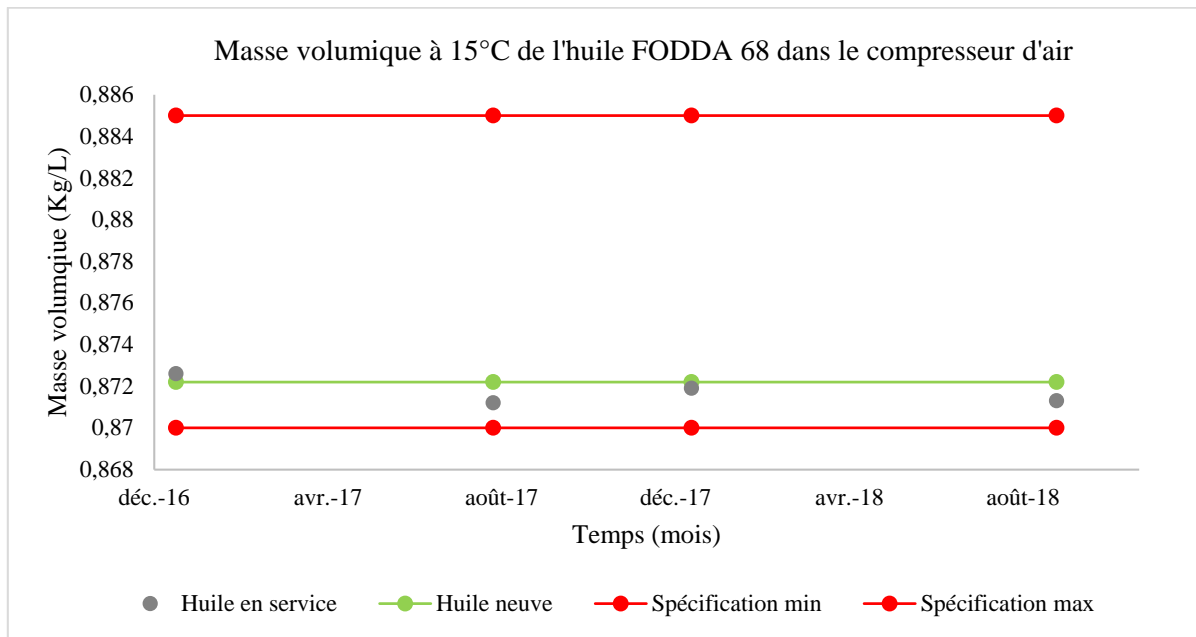


Figure 4.3: Variation de la masse volumique à 15°C de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.

La masse volumique à 15°C de l'huile neuve répond aux spécifications.

La masse volumique à 15°C de l'huile en service n'a pas beaucoup changé, elle est légèrement inférieure à l'huile neuve, et elle répond toujours aux spécifications.

La variation de la masse volumique de l'huile en service à 15°C n'est pas inquiétante car la variation ne dépasse pas 0,015 kg/L, donc elle ne renseigne sur aucune dégradation ou une contamination de l'huile.

• **Viscosité cinématique**

La figure (4.4) et la figure (4.5) présentent la variation de la viscosité cinématique à 40°C et à 100°C de l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01 en fonction du

temps (mois), la viscosité de l'huile neuve, les niveaux d'avertissement données par la norme ASTM D6224 et les valeurs fixées par les spécifications sont prises comme référence.

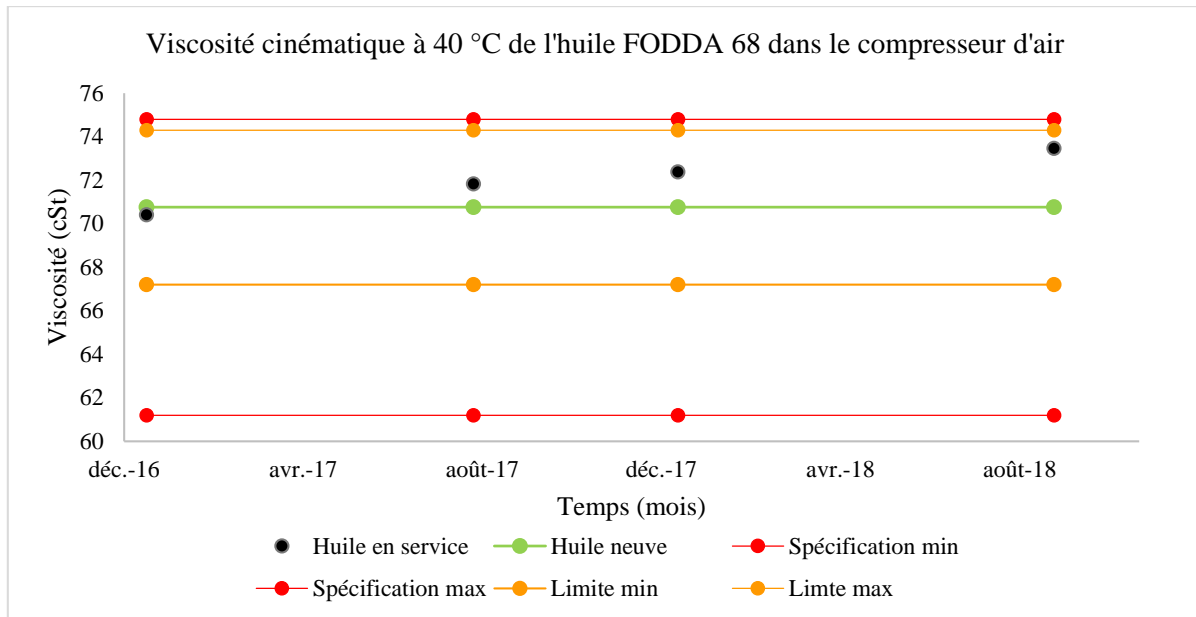


Figure 4.4: Variation de la viscosité cinématique à 40°C de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.

La viscosité cinématique à 40°C de l'huile en service a augmenté en fonction du temps jusqu'à atteindre une valeur proche de la limite (73,46 en août 2018).

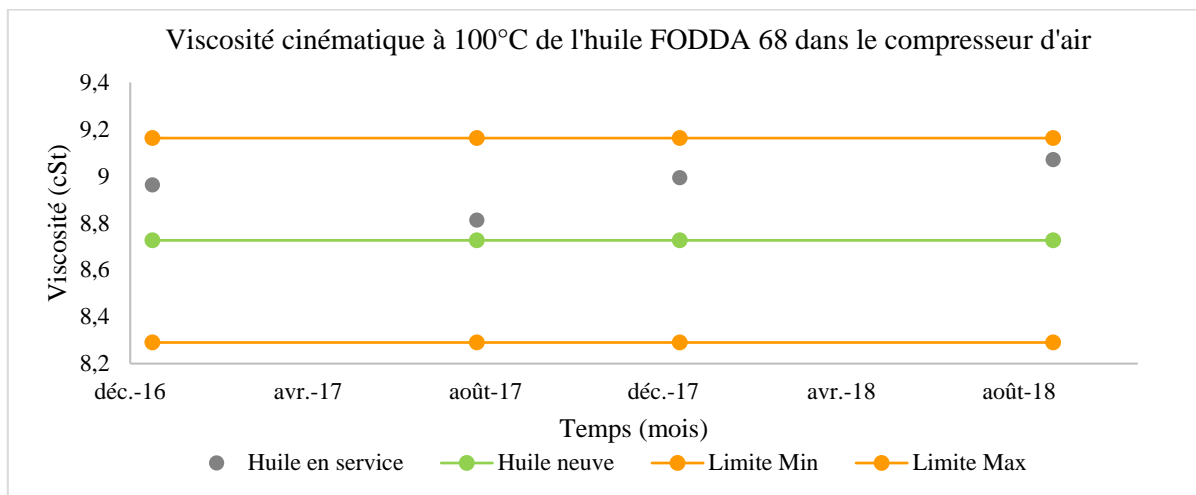


Figure 4.5: Variation de la viscosité cinématique à 100°C de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.

La viscosité cinématique à 100°C de l'huile en service a diminué après 8 mois (échantillon de décembre 2016) par rapport à l'huile neuve, ensuite elle a augmenté pour s'approcher de la valeur limite.

L'augmentation de la viscosité pour les deux températures peut être traduite par une :

- Évaporation de composés volatiles provenant de l'huile de base.
- Formation des espèces lourdes provenant de l'oxydation ou de l'hydrolyse.
- Pollution par des poussières ou des particules solides en suspension.

• **Indice de viscosité**

La figure (4.6) présente la variation de l'indice de viscosité de l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01 en fonction du temps (mois), l'indice de viscosité de l'huile neuve et la valeur fixée par les spécifications sont prises comme référence.

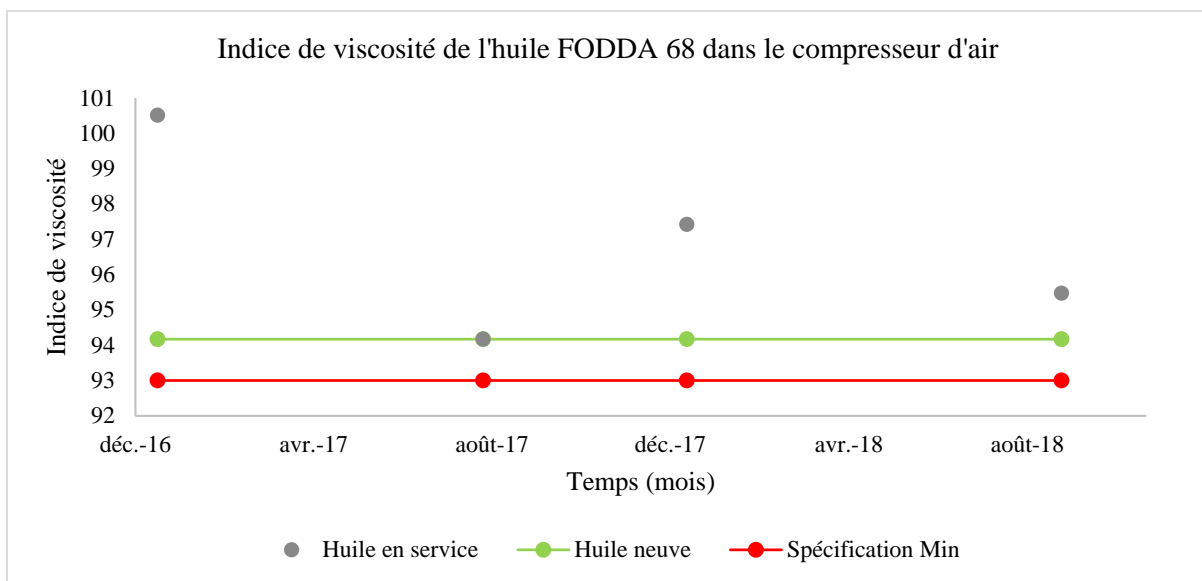


Figure 4.6: Variation de l'indice de viscosité de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.

La valeur de l'indice de viscosité n'est pas stable, une fois elle diminue et une fois elle augmente mais elle est toujours supérieure ou égale à l'indice de viscosité de l'huile neuve, cela veut dire que l'huile conserve sa viscosité dans une large gamme de températures.

• **Indice d'acide total (TAN) :**

L'indice d'acide total de l'huile neuve n'a pas été mesuré mais une augmentation de 0,20 mgKOH/g par rapport à l'huile neuve (selon la norme ASTM D6224) est un signe d'alerte. Le TAN de l'huile en service mesuré en décembre 2017 est à 0,05 et s'élève est à 0,42mgKOH/g en août 2017 (8mois après) il y a donc une augmentation de 0,37mgKOH/g, cela veut dire qu'il y a une formation des produits acides. La formation des produits acides peut être due à :

- La réaction de l'huile en service avec l'oxygène de l'air à une température élevée, ce qui donne des produits d'acides organiques et des produits d'oxydation insolubles.
- Une contamination par l'eau, l'eau peut réagir avec l'huile de base ou avec les additifs, la réaction est connue sous le nom de l'hydrolyse et donne des produits acides.
- À la consommation des additifs anti-oxydants.

• **Point d'éclair**

La figure (4.7) présente la variation de point d'éclair de l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01 en fonction du temps (mois), le point d'éclair de l'huile neuve et le niveau d'avertissement donné par la norme ASTM D6224 sont pris comme référence.

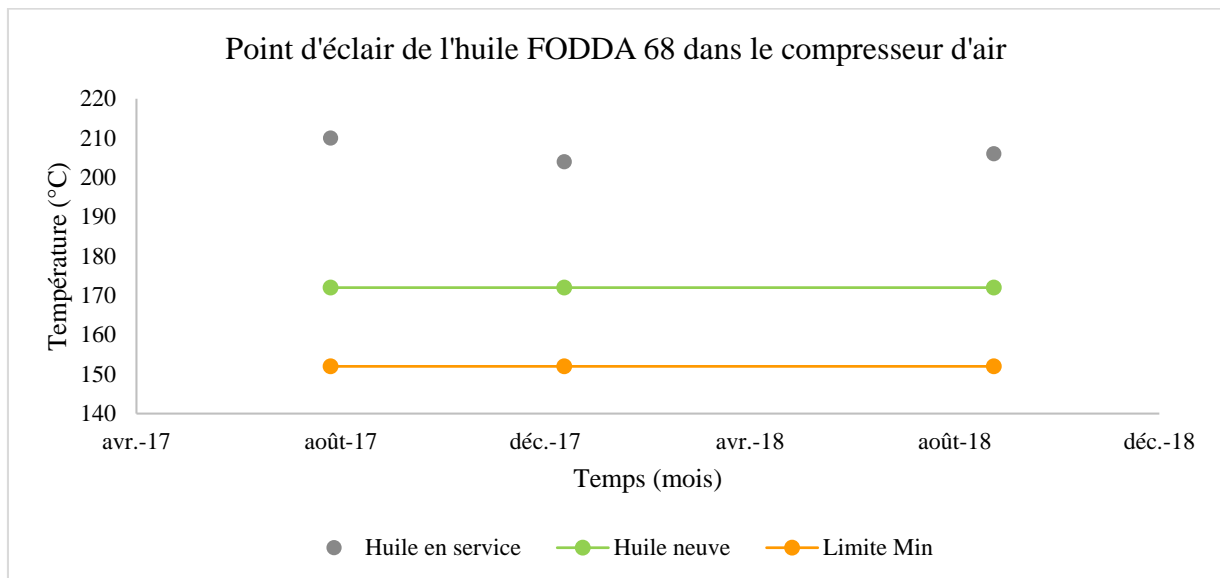


Figure 4.7: Variation de point d'éclair de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.

Le point d'éclair de l'huile en service est au-dessus de celui de l'huile neuve et les deux sont au-dessus de la limite, l'augmentation de la température peut être due à la présence des substances lourdes formées lors de l'oxydation ou par l'hydrolyse de l'huile. Le point d'éclair peut aussi augmenter lorsque les produits légers de l'huile s'évaporent, il est normal que le point d'éclair s'élève. Dans tous les cas de figure, l'huile usagée ne présente plus de danger que l'huile neuve.

- **Point d'écoulement**

La figure (4.8) présente la variation de point d'écoulement de l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01 en fonction du temps (mois), le point d'écoulement de l'huile neuve et la valeur fixée par la spécification sont pris comme référence.

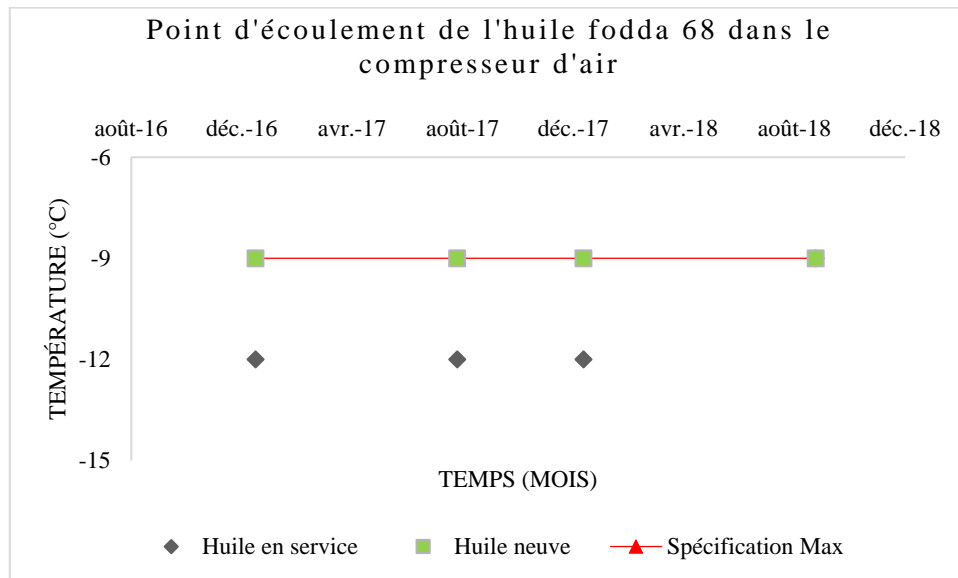


Figure 4.8: Variation de point d'écoulement de l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.

Le point d'écoulement a diminué par rapport à l'huile neuve cela peut être expliqué par une dégradation qui a conduit à la formation des produits légers.

- **Couleur**

La couleur de l'huile en service a évolué au cours de son utilisation. L'huile en service est devenue plus sombre par rapport à l'huile neuve cela peut être dû à la présence des polluants ou aux produits d'oxydation.

- **Corrosion à la lame de cuivre**

D'après les résultats de l'examen de lame de cuivre, l'huile en service est classée dans la catégorie « 3b ». Cette catégorie 3b indique une ternissure importante, ce qui indique que l'huile a un caractère agressif vis-à-vis du cuivre.

- **Teneur en eau**

La teneur en eau de l'huile neuve n'a pas été mesurée donc la comparaison est faite entre les échantillons d'huile usagée testés. En décembre 2017 la quantité d'eau présente dans l'huile

en service était nulle, 8mois après, la teneur en eau a augmenté d'une façon très remarquable de 0 ppm à 3000 ppm, cela peut être expliqué par un défaut d'étanchéité séparant l'huile de l'eau ce qui a conduit à une contamination de l'huile par l'eau.

- **Teneur en soufre**

L'huile neuve contient du soufre, le soufre est un constituant naturel de l'huile de base et il est aussi utilisé comme additif anti-usure, antioxydant ou comme inhibiteur de corrosion. La quantité du soufre a diminuée par rapport à l'huile neuve cela peut être expliqué par la consommation des additifs contenus dans l'huile neuve.

- **Teneur en eau et sédiments**

L'huile neuve contient des traces non dosables d'eau et de sédiments. La teneur en eau et sédiments de l'huile en service est nulle.

- **Analyse des métaux**

- ❖ **Teneur en métaux d'usure**

La figure (4.9) présente l'évolution de la teneur en métaux de l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01 en fonction du temps (mois), de la teneur en métaux de l'huile neuve est prise comme référence.

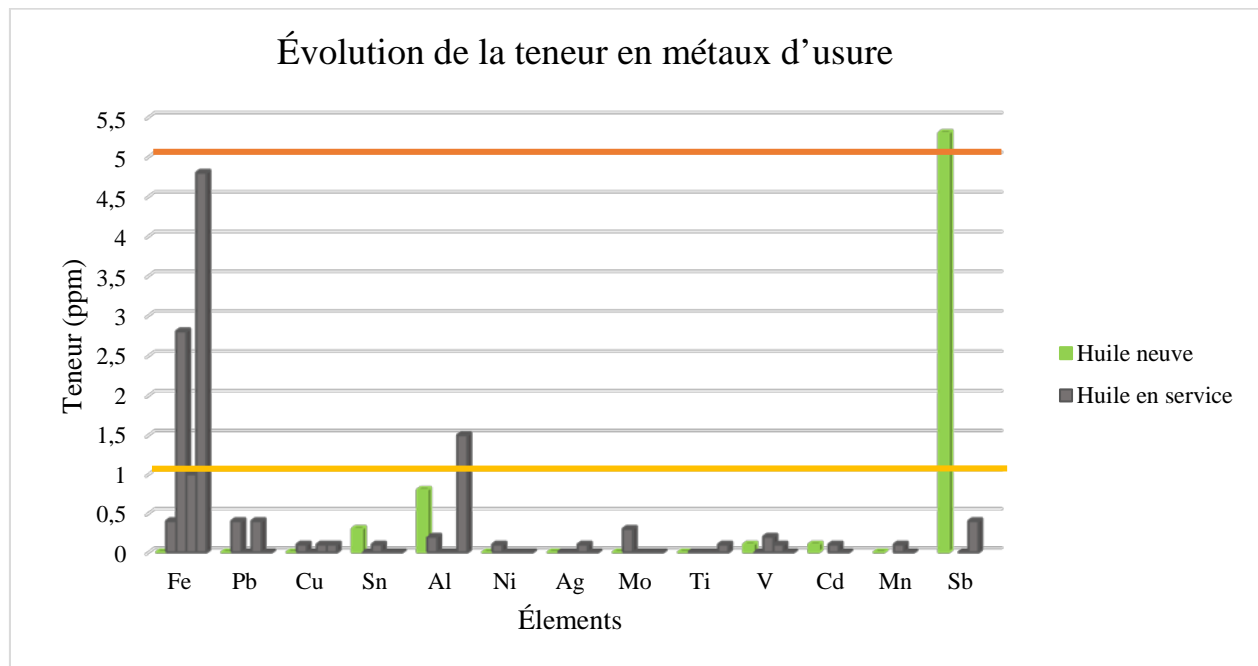


Figure4.9: Évolution de la teneur en métaux d'usure dans l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01

L'huile neuve contient des traces d'étain, d'aluminium, de vanadium et de cadmium. Ces métaux peuvent provenir des bacs de stockage de l'huile.

L'huile neuve contient aussi de l'antimoine comme additif pour pressions extrêmes. La concentration est élevée dans l'huile neuve et devient très faible dans l'huile en service. L'additif s'est donc dégradé au cours de l'utilisation de l'huile.

Les principaux métaux présents dans l'huile en service sont

- Le fer

La présence du fer est peut être due à l'usure des pièces métalliques (paliers, roulements, arbre...) par cavitation car la présence d'eau dans l'huile peut améliorer l'entraînement de l'air favorisant ainsi les phénomènes de cavitation. La présence de l'eau dans l'huile et les constituants avec une fonction ester peut provoquer aussi l'hydrolyse ce qui donne des produits acides. Les acides ainsi formés entraînent une corrosion des métaux réactifs.

La concentration du fer a d'abord augmenté par rapport à celle de l'huile neuve, ensuite elle a diminué. Le spectromètre ne mesure que la concentration des particules de taille inférieure à 10µm donc il se pourrait que les particules de fer se soient agglomérées acquérant une taille supérieure à 10µm qui ne permet pas leur détermination.

- L'aluminium

L'aluminium est déjà présent dans l'huile neuve, sa concentration a diminué jusqu'à s'annuler ensuite elle a augmenté pour atteindre 1,5 ppm.

La diminution peut s'expliquer par la présence de particules supérieures à 10µm qui n'ont pas été mesurées.

L'augmentation peut s'expliquer par l'usure des pièces en aluminium ou à la présence de saletés qui provient d'un mélange d'oxydes d'aluminium et de silicium (poussière et sable), cela veut dire que la quantité de silicium doit être aussi élevée.

Les autres métaux comme le chrome, le cuivre, l'étain, le nickel, l'argent, le molybdène, le titane, le vanadium, le cadmium et le manganèse sont en très faibles quantités (0,1 ppm), et donc ne renseignent sur aucune usure ou corrosion des pièces constituant le compresseur.

❖ Teneur en additifs

La figure (4.10) et la figure (4.11) présentent l'évolution de la teneur en additifs dans l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01 en fonction du temps (mois), la concentration des additifs dans l'huile neuve est prise comme référence.

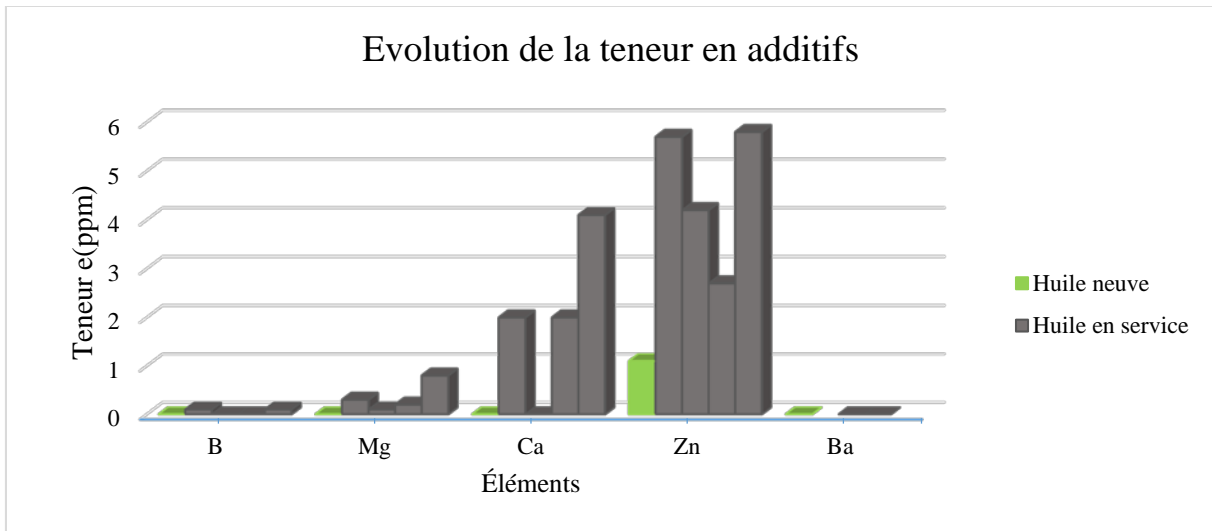


Figure 4.10:Évolution de la teneur en additifs dans l’huile FODDA 68 dans le compresseur d’air PT-401-01.

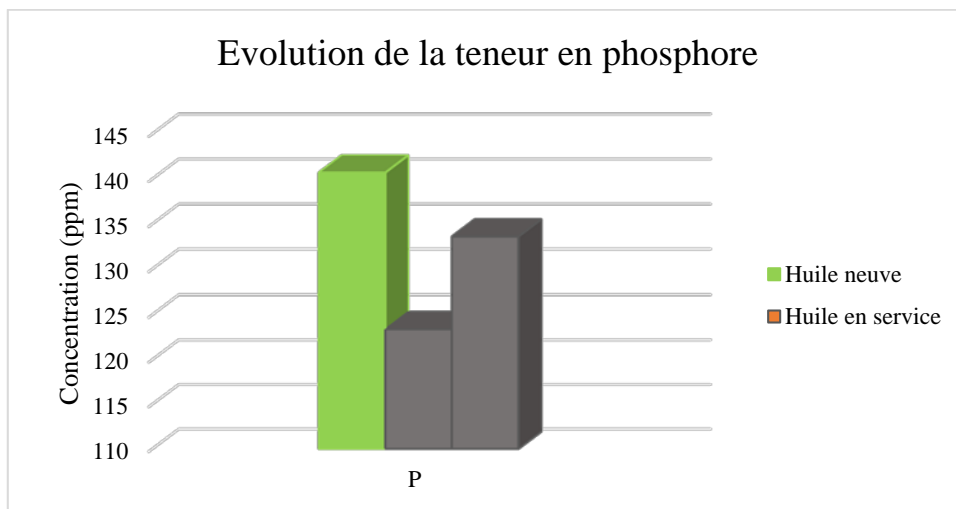


Figure 4.11: Évolution de la teneur en phosphore dans l’huile FODDA 68 dans le compresseur d’air PT-401-01.

Les additifs présents dans l’huile neuve sont le zinc et le phosphore. Le zinc et le phosphore sont utilisés comme additifs anti-usure, antioxydant, détergent et inhibiteur de corrosion. Dans l’huile en service la concentration du phosphore a diminué c’est-à-dire qu’il y eu une usure des pièces ou une oxydation de l’huile. Par contre la concentration du zinc a augmenté dans l’huile en service, c’est vrai que le zinc est utilisé comme un additif mais il peut aussi être un métal d’usure qui provient des aciers galvanisés et il est souvent allié avec le cuivre pour faire du laiton. Il s’agirait donc d’une contamination provoquée par l’usure des pièces.

En ce qui concerne les autres additifs comme le bore, le baryum, le magnésium et le calcium, ils ne sont pas présents dans l'huile neuve mais dans l'huile en service il y a une augmentation de la concentration en magnésium et en calcium ces deux éléments proviennent de contamination de l'huile par l'eau.

Le bore et le baryum sont absents dans l'huile en service.

❖ **Teneur en polluants**

La figure (4.12) l'évolution de la teneur en polluants dans l'huile FODDA 68 en service dans le compresseur d'air PT-401-01 en fonction du temps (mois), la concentration des polluants de l'huile neuve est prise comme référence.

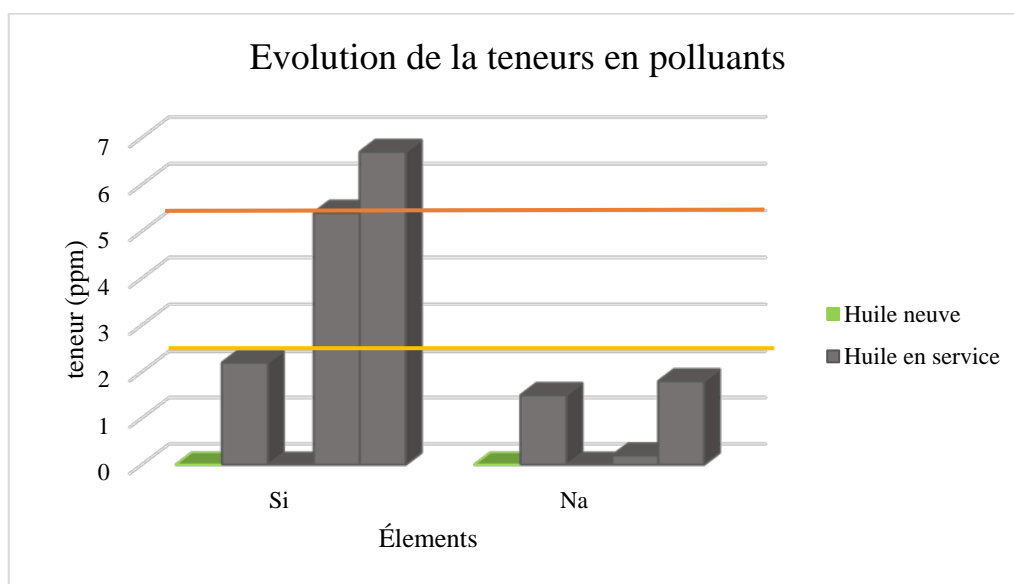


Figure 4.12: Évolution de la teneur en polluants dans l'huile FODDA 68 dans le compresseur d'air PT-401-01.

L'huile neuve ne contient aucun polluant.

Le lithium et le potassium ne sont pas présents dans l'huile en service.

L'huile en service contient deux principaux polluants le silicium et le sodium.

Le silicium est considéré comme un indice de saletés qui provient des poussières atmosphériques ou à l'introduction de sable dans le circuit de lubrification. Le silicium est aussi utilisé dans les modificateurs de liquide de refroidissement, il peut donc apparaître sous la forme d'un contaminant dans le cas d'une fuite interne de liquide de refroidissement.

Le sodium dans l'huile en service est peut être dû à la présence de liquide de refroidissement dans l'huile, le sodium est utilisé comme un élément caloporteur dans les liquides de refroidissement.

4.1.2. Huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603

a. Résultats d'analyse

Les essais effectués sur l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603 ont donnés les résultats présentés dans le tableau (4.6).

Tableau 4.6: Résultats d'analyse de l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603.

Type de machine	Huile Neuve TORBA 46	Turbocompresseur CD-603				
		31/12/2016	07/08/2017	22/12/2017	01/09/2018	15/02/2019
Date de prélèvement		31/12/2016	07/08/2017	22/12/2017	01/09/2018	15/02/2019
Masse volumique à 15°C (Kg/L)	0,8696	0,8699	0,8700	0,8701	0,8697	0,8699
Visc. cinématique à 40°C (cSt)	45,2	48,29	48,46	48,45	51,28	48,57
Visc.cinématique à 100°C (cSt)	6,703	7,057	6,908	7,065	7,183	7,124
Indice de viscosité	100,65	102,98	96,96	102,75	94,54	104,4
Indice d'acide total (TAN) (mgKOH/g)	0,1	-	-	0,09	0,13	0,06
Point d'éclair (°C)	208,0	-	228,0	226,0	234,0	234,0
Point d'écoulement (°C)	-9	-24	-18	-21	-15	-
Point de congélation (°C)	-12	-27	-21	-24	-18	-
Couleur ASTM	1	3,5	3,5	L 4,0	4	-
Corrosion à la lame de cuivre classe	1a	1a	1a	1a	1b	1a
Teneur en eau et sédiment (%V/V)	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	TND
Teneur en eau par KARL FISHER (ppm)	19,3	-	-	12,5	31,8	18,1
Teneur en soufre (%poids)	0,058	0,120	0,170	0,177	0,170	0,167

Analyses et interprétations

L'analyse de la spectroscopie d'émission de l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603 a donné les résultats présentés dans le tableau (4.7) :

Tableau 4.7: Résultats d'analyse des métaux dans l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603.

Type de machine	Huile Neuve TORBA 46	Turbocompresseur CD-603				
		Date de prélèvement	31/12/2016	07/08/2017	22/12/2017	31/08/2018
Usure (ppm)						
Fer (Fe)	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1	0,4
Chrome (Cr)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Plomb (Pb)	0,0	0,5	0,0	0,8	0,0	1,2
Cuivre (Cu)	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2
Étain (Sn)	0,2	0,0	0,5	0,1	0,0	0,3
Aluminium (Al)	0,0	0,0	0,8	0,1	0,0	0,1
Nickel (Ni)	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,4
Argent (Ag)	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
Molybdène (Mo)	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0	0,3
Titane (Ti)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4
Vanadium (V)	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,3
Cadmium (Cd)	0,0	-	0,0	0,0	-	
Manganèse (Mn)	0,0	-	0,2	0,0	-	
Antimoine (Sb)	0,0	-	0,4	0,4	-	
Additifs (ppm)						
Bore (B)	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
Magnésium (Mg)	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1
Calcium (Ca)	1,9	1,2	0,0	1,2	1,3	1,1
Zinc (Zn)	2,0	-	0,3	2,0	1,1	1,3
Baryum (Ba)	0,0	-	0,0	0,0	-	
Phosphore (P)	0,0	-	1,5	0,0	-	
Polluants (ppm)						
Silicium (Si)	0,0	3,3	0,0	0,5	1,3	2,2
Sodium (Na)	0,1	1,5	0,0	0,8	2,3	1,8
Lithium (Li)	0,0	-	0,0	0,0	-	-
Potassium (K)	0,0	-	0,0	0,1	-	-

b. Interprétation

• **Masse volumique**

La figure (4.13) donne la variation de la masse volumique à 15°C de l’huile TORBA46en service dans le turbocompresseur CD-603 en fonction du temps (mois). La masse volumique de l’huile neuve et la valeur fixée par la spécification sont prises comme référence.

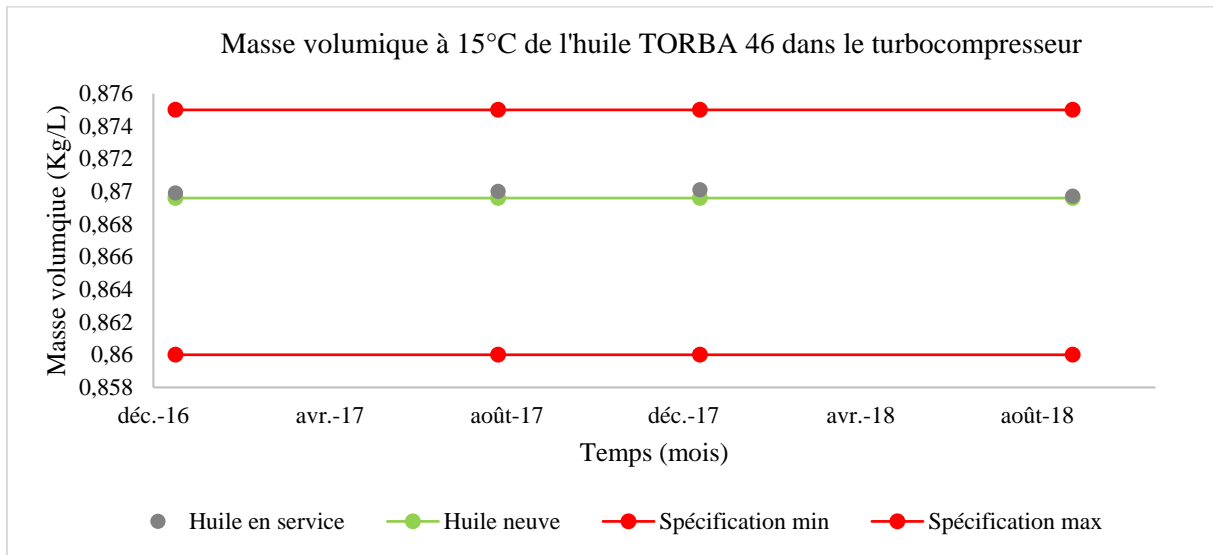


Figure 4.13: Variation de la masse volumique de l’huile TORBA 46en service dans le turbocompresseur CD-603.

La masse volumique à 15 °C de l’huile neuve répond à la spécification.

La masse volumique à 15°C de l’huile en service n’a pas beaucoup changé, elle est restée presque constante et elle répond toujours aux spécifications.

La variation de la masse volumique de l’huile en service à 15°C n’est pas prise en considération donc elle ne peut pas être considérée comme un indice de contamination ou de dégradation de l’huile en service.

• **Viscosité cinématique**

La figure (4.14) la variation de la viscosité cinématique à 40°C de l’huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603 en fonction du temps (mois), la viscosité de l’huile neuve, les niveaux d’avertissements donnés par la norme ASTM D6224 et les valeurs fixées par la spécification sont pris comme référence.

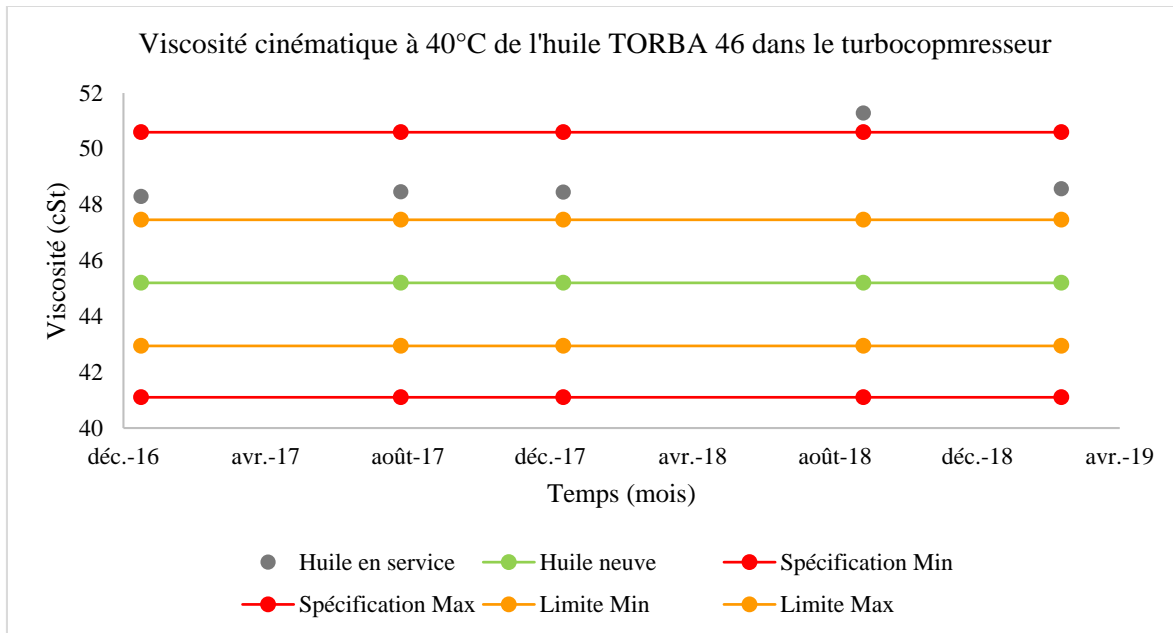


Figure 4.14: Variation de la viscosité à 40°C de l'huile TORBA 46 dans le turbocompresseur CD-603.

L'huile neuve TORBA 46 répond aux spécifications.

En revanche, la viscosité cinématique à 40°C de l'huile en service est supérieure à celle de l'huile neuve et elle dépasse le niveau d'avertissement de la norme.

La viscosité a augmenté (elle est restée constante pendant une année), cette augmentation est devenue plus importante en août 2018 (51,28 cSt) dépassant la limite supérieure. Ensuite elle a diminué jusqu'à 48,57cSt mais elle reste toujours une valeur élevée.

La figure (4.15) traduit la variation de la viscosité cinématique à 100°C de l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603 en fonction du temps (mois). La viscosité de l'huile neuve, les niveaux d'avertissement donnés par la norme ASTM D6224 sont pris comme référence.

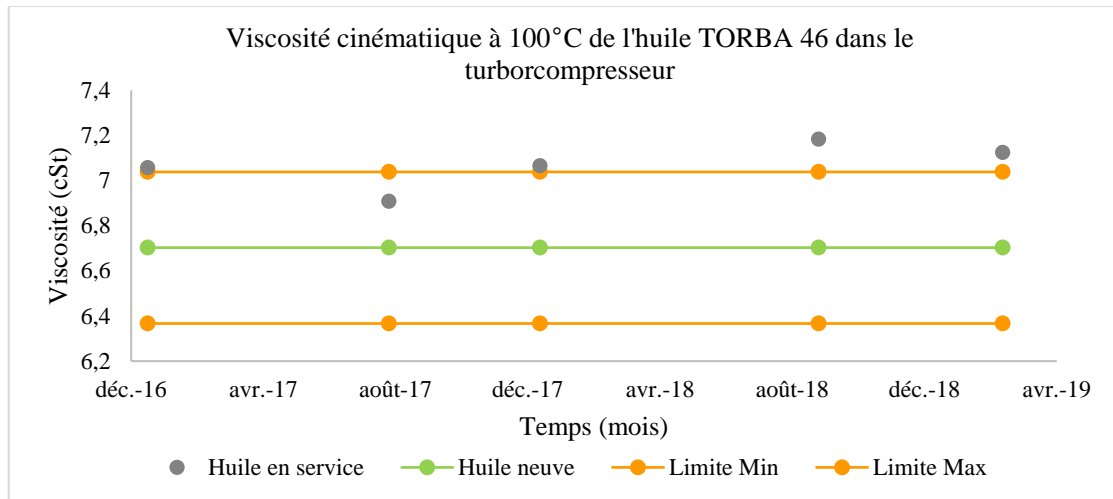


Figure 4.15: Variation de la viscosité à 100 °C de l’huile en service TORBA 46 dans le turbocompresseur CD-603.

La viscosité cinématique à 100 °C de l’huile service est supérieure à l’huile neuve, sa valeur n’est pas vraiment stable parfois elle diminue et parfois elle augmente mais ça reste une valeur élevée.

L’augmentation de la viscosité cinématique de l’huile en service pour les deux températures (40°C et 100°C) peut être expliquée par :

- L’oxydation, cette dernière doit être confirmée par une augmentation de l’indice d’acide.
- Une capacité insuffisante des filtres qui peut entraîner des produits insolubles qui augmente donc la valeur de la viscosité.
- Évaporation de composés les plus légers de l’huile de base conduisant à un épaissement de l’huile.
- La polymérisation des composés essentiels de l’huile qui peut se produire lorsque l’huile est soumise à des températures élevées.

- **Indice de viscosité**

La figure (4.16) présente la variation de l’indice de viscosité de l’huile TORBA 46 en service dans turbocompresseur CD-603 en fonction du temps (mois) ; l’indice de viscosité de l’huile neuve et la valeur fixée par la spécification sont pris comme référence.

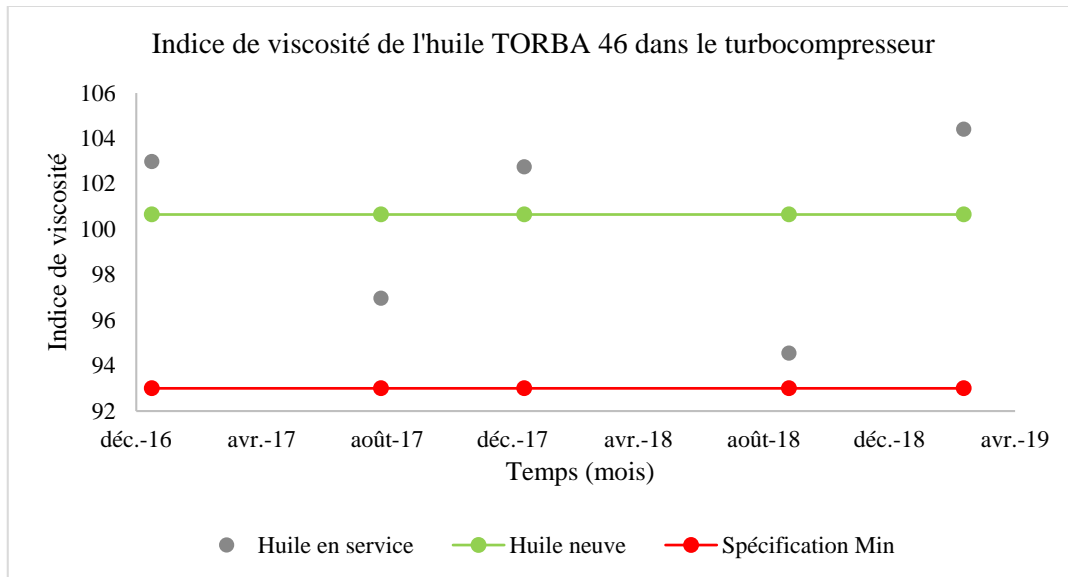


Figure 4.16: Variation de l'indice de viscosité de l'huile en service TORBA 46 dans le turbocompresseur CD-603.

L'indice de viscosité de l'huile neuve répond à la spécification.

La valeur de l'indice de viscosité de l'huile en service n'est pas stable, une fois elle diminue, une fois elle augmente mais elle est toujours supérieure ou égale à l'indice de viscosité l'huile neuve, cela veut dire que l'huile résiste à la variation de température et conserve sa viscosité dans une large gamme de températures.

- **L'indice d'acide total (TAN)**

La figure (4.17) présente la variation de l'indice d'acide total de l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603 en fonction du temps (mois) ; le TAN de l'huile neuve et la valeur fixée par la spécification sont pris comme référence.

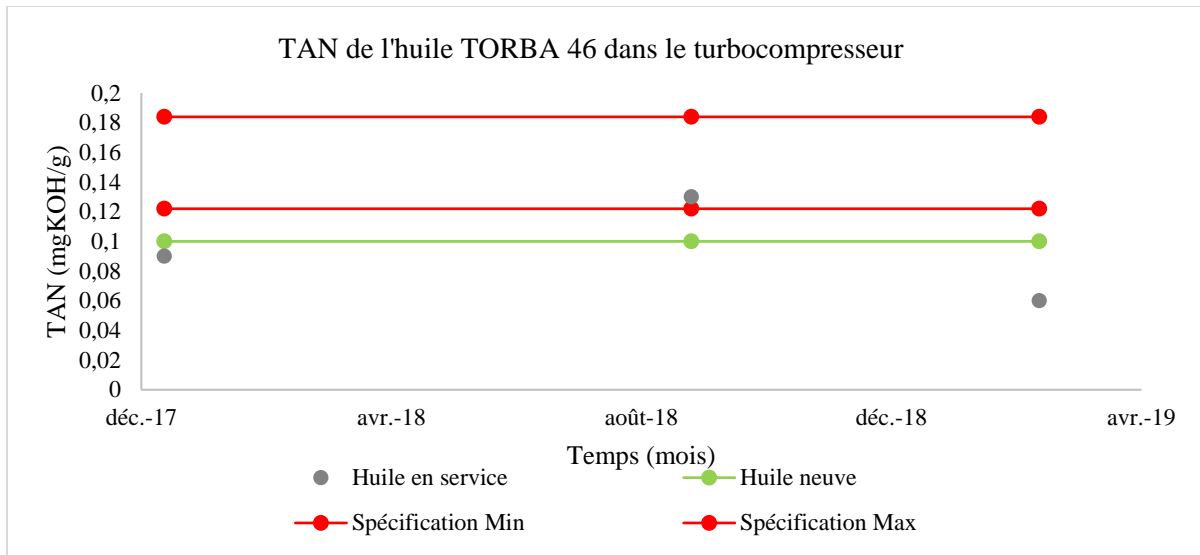


Figure 4.17: Variation de l'indice d'acide total de l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603.

Le TAN de l'huile en service est faible, il est inférieur aux spécifications sauf pour l'échantillon analysé en août 2018 où il a augmenté jusqu'à atteindre 0,13 mgKOH/g mais cette valeur répond à la spécification et elle très proche de la limite inférieure, ce qui indique que l'huile en service n'a pas subi d'oxydation.

- **Point d'éclair**

La figure (4.18) présente la variation de point d'éclair de l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603 en fonction du temps (mois). Le point d'éclair de l'huile neuve et la valeur limite fixée par la norme ASTM D6224 sont pris comme référence.

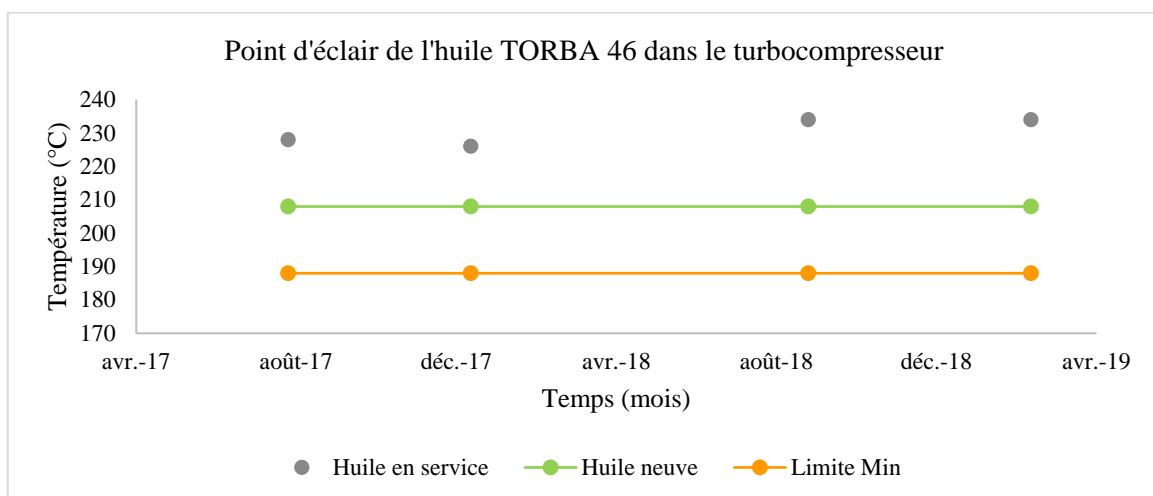


Figure 4.18: Variation de point d'éclair de l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603

Le point d'éclair de l'huile neuve répond à la spécification.

Le point d'éclair de l'huile en service a augmenté, l'augmentation pourrait être le résultat de la présence des fractions lourdes dans l'huile qui se sont formées au cours de processus et probablement par l'évaporation des fractions les plus légères de l'huile.

- **Point d'écoulement**

La figure (4.19) présente la variation de point d'écoulement de l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603 en fonction du temps (mois). Le point d'écoulement de l'huile neuve et la valeur fixée par la spécification sont pris comme référence.

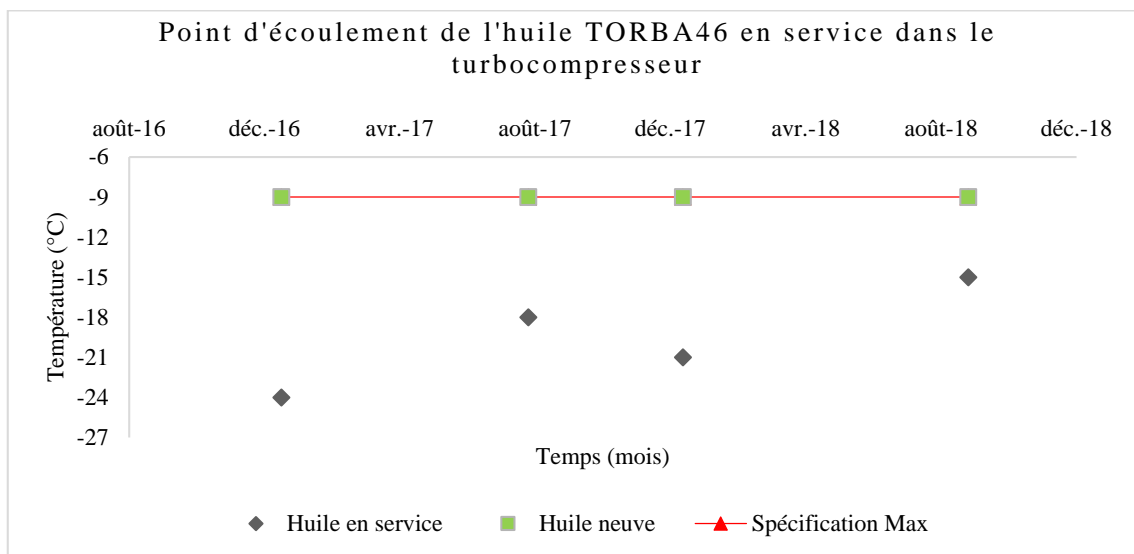


Figure 4.19: Variation de point d'écoulement de l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603.

Le point d'écoulement de l'huile neuve répond à la spécification.

Le point d'écoulement de l'huile en service a diminué par rapport à l'huile neuve, cette diminution est due à la présence des produits légers dans l'huile en service.

- **Couleur ASTM**

La couleur de l'huile en service est devenue plus sombre par rapport à l'huile neuve.

Le changement de la couleur peut être dû à des phénomènes d'oxydation lors des hausses de température.

- **Corrosion à lame de cuivre**

D'après les résultats de l'examen de lame de cuivre, l'huile en service est classée dans la catégorie « 1a » ce qui est identique à celle de l'huile neuve. La catégorie **1a** indique une ternissure légère donc l'huile est très faiblement corrosive et n'a pas de caractère agressif vis à vis du cuivre.

- **Teneur en eau**

La teneur en eau dans l'huile en service a varié par rapport à celle de l'huile neuve, elle a d'abord diminué puis augmenté, avant de diminuer de nouveau.

La diminution de la teneur en eau dans l'huile en service peut être due à l'évaporation de cette dernière, car il arrive souvent qu'aux pressions et températures de service, cette eau s'évapore.

L'augmentation de la teneur en eau peut être due à la condensation de l'humidité présente dans l'air ambiant au niveau des réservoirs d'huile qui sont souvent exposés à l'air ambiant afin de les conserver à la pression atmosphérique ou lors du refroidissement du système lubrifié.

- **Teneur en soufre**

La teneur en soufre dans l'huile en service a augmenté par rapport à l'huile neuve cette augmentation est due à une pollution ou une contamination par le soufre.

- **La teneur en eau et sédiment**

La teneur en eau et sédiment dans l'huile neuve est nulle.

La teneur en eau et sédiment dans l'huile en service et la même que dans l'huile neuve, elle est nulle pour tous les échantillons sauf pour le dernier qui contient des traces non dosables.

- **Analyse des métaux**

- ❖ **Teneur en métaux d'usure**

La figure (4.20) présente l'évolution de la teneur en métaux d'usure dans l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603 en fonction du temps (mois). La teneur en métaux de l'huile neuve est prise comme référence.

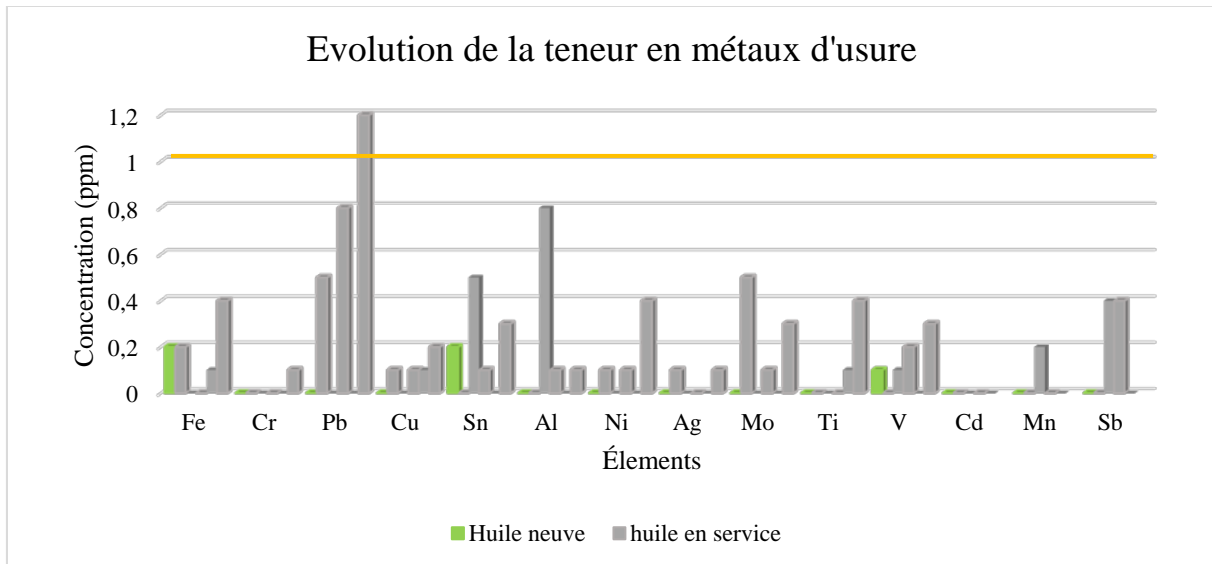


Figure 4.20: Évolution de la teneur en métaux d'usure dans l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603.

L'huile neuve ne contient pas des métaux d'usure à part des traces de fer, d'étain et de vanadium, la teneur de ces derniers est très faible et ne dépasse pas 0,2ppm, donc elle ne pose pas problème.

L'huile en service contient principalement du plomb. La quantité du plomb a augmenté jusqu'à 1,2 ppm, la présence de plomb dans l'huile en service peut être due à l'usure des pièces en plomb ou à la corrosion de matériaux antifricition.

Les autres métaux comme le fer, le chrome, le cuivre, l'étain, le nickel, l'argent, le molybdène, le titane, le vanadium, le cadmium et le manganèse, antimoine, le chrome et l'aluminium sont en faibles quantités qui ne dépassent pas 0,9ppm.

❖ **La teneur en additifs**

La figure (4.21) présente l'évolution de la teneur en additifs dans l'huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603 en fonction du temps (mois).La concentration des additifs dans l'huile neuve est prise comme référence.

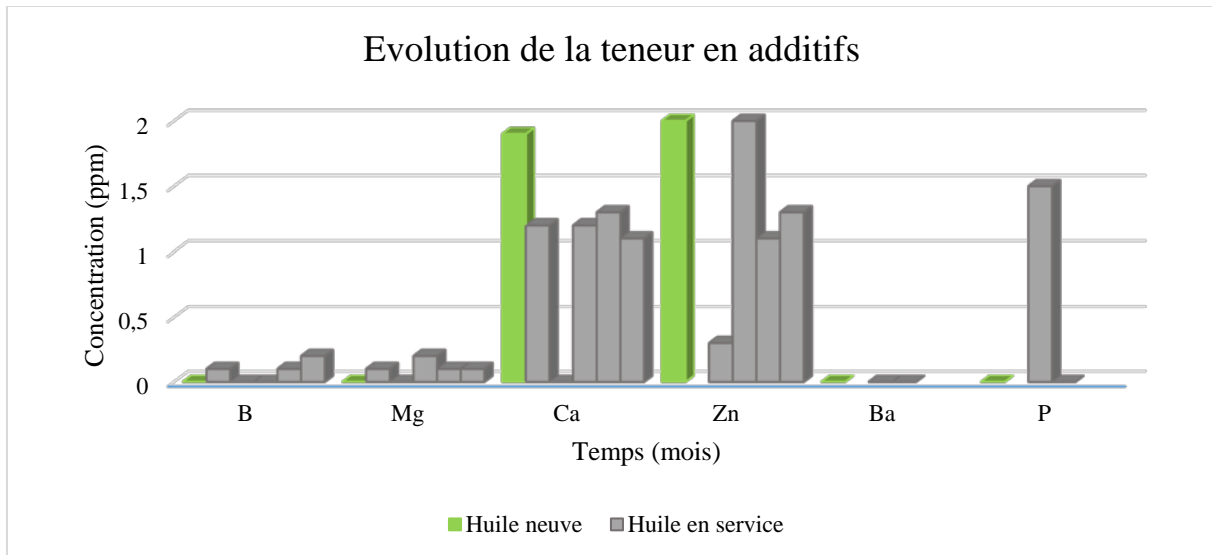


Figure 4.21: Évolution de la teneur en additifs dans l’huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603.

Les additifs présents dans l’huile neuve sont le calcium et le zinc.

Le calcium est utilisé comme un additif détergent et inhibiteur de corrosion, la concentration de calcium a diminué cela peut être expliqué par sa consommation.

Le zinc est utilisé comme additif anti-usure, antioxydant, détergent et inhibiteur de corrosion, la concentration du zinc a augmenté dans l’huile en service, c’est vrai que le zinc est utilisé comme un additif mais il peut aussi être un métal d’usure qui provient des aciers galvanisés et il est souvent allié avec le cuivre pour faire du laiton.

Les autres métaux comme le bore, le magnésium et le phosphore ne sont pas présents dans l’huile neuve mais sont présents dans l’huile en ; ils sont donc considérés comme des polluants ou des métaux d’usure. La concentration du phosphore est peu élevée, elle a atteint 1,5ppm. La présence du phosphore peut être due à l’usure ou à la corrosion des pièces en bronzes ou en fontes.

La concentration du bore et du magnésium est très faible elle ne dépasse pas 0,2ppm donc elle ne pose pas problème.

❖ **La teneur en polluants :**

La figure (4.22) présente l’évolution de la teneur en polluants dans l’huile TORBA 46 en service dans le turbocompresseur CD-603 en fonction du temps. La teneur des polluants dans l’huile neuve est prise comme référence.

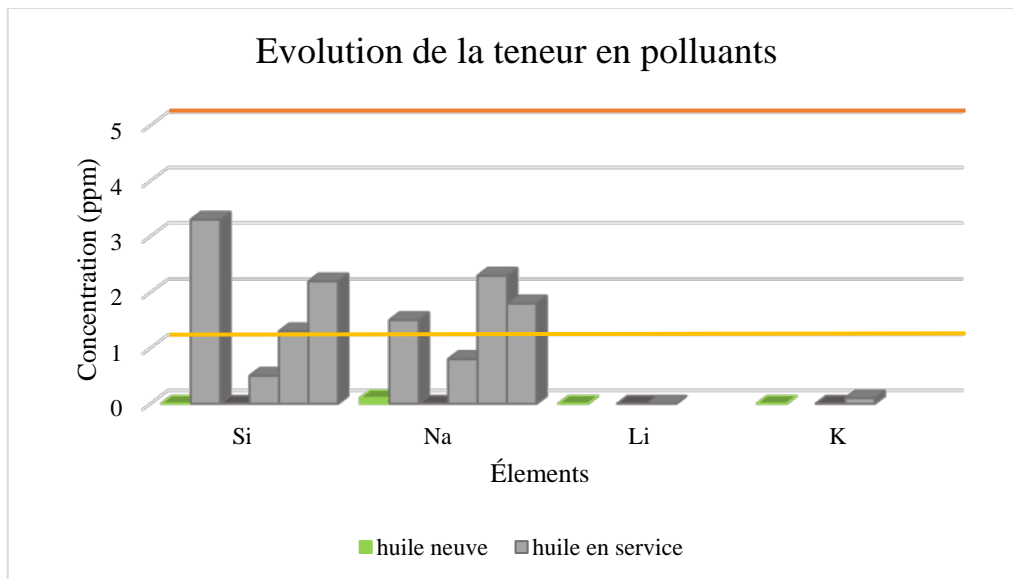


Figure 4.22: Évolution de la teneur en polluants dans l'huile TORBA46 en service dans le turbocompresseur CD-603.

L'huile neuve est exempte de polluants à l'exception d'une faible quantité de sodium (0,1 ppm).

Les principaux polluants présents dans l'huile en service sont :

- Le silicium, qui peut provenir de contaminations due à une mauvaise étanchéité de joints, de l'altération des joints en silicone, de la poussière atmosphérique ou d'une fuite interne de liquide de refroidissement.
- Le sodium, qui peut être dû à la présence de liquide de refroidissement dans l'huile.

4.2.3. Huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201

a. Résultats d'analyse :

Les essais effectués sur l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander ont donné les résultats présentés dans le tableau (4.8) :

Tableau 4.8: Résultats d'analyse de l'huile TORBA 68 en service dans le Turboexpander EC-201.

Type de machine	Huile Neuve TORBA 68	Turboexpander EC-201		
Date de prélèvement		31/12/2016	22/12/2017	01/08/2018
Observation		Standby (*)	En service	En service
Masse volumique à 15°C (Kg/L)	0,8726	0,8659	0,8719	0,8687
Visc. cinématique à 40°C (cSt)	64,82	48,43	64,05	66,00
Visc. cinématique à 100°C (cSt)	8,182	7,405	8,430	8,507
Indice de viscosité	92,62	115,08	101,16	98,53
Indice d'acide total (TAN) (mgKOH/g)	-	0,13	0,10	0,40
Point d'éclair (°C)	226,0	-	190,0	75,0
Point d'écoulement (°C)	-12	-9	-9	-9
Couleur ASTM	L1,5	L1,0	L1,5	L1,5
Corrosion à la lame de cuivre classe	1b	1a	1a	1b
Teneur en eau et sédiment (%V/V)	< 0,1	< 0,05	Nulle	Nulle
Teneur en eau par KARL FISHER (ppm)	-	-	4,2	25,9
Teneur en soufre (%poids)	0,064	0,059	0,058	0,056

(*) : En arrêt

L'analyse de la spectroscopie d'émission de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 a donné les résultats présentés dans le tableau (4.9) :

Tableau 4.9: Résultats d'analyse des métaux dans l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.

Type de machine	Huile Neuve TORBA 68	Turboexpander EC-201		
Date de prélèvement		22/12/2017	01/08/018	15/02/2019
Usure (ppm)				
Fer (Fe)	0,0	0,3	0,5	0,1
Chrome (Cr)	0,0	0,1	0,0	0,0
Plomb (Pb)	0,0	0,5	0,0	0,0
Cuivre (Cu)	0,0	0,2	0,5	0,4
Étain (Sn)	0,3	0,0	0,0	0,0
Aluminium (Al)	0,8	0,1	0,2	0,0
Nickel (Ni)	0,0	0,3	0,0	0,0
Argent (Ag)	0,0	0,0	0,0	0,0
Molybdène (Mo)	0,1	0,6	0,0	0,0
Titane (Ti)	0,0	0,2	0,0	0,0
Vanadium (V)	0,2	0,2	0,0	0,0
Cadmium (Cd)	0,0	-	0,0	-
Manganèse (Mn)	0,3	-	0,0	-
Antimoine (Sb)	0,7	-	0,6	-
Additifs (ppm)				
Bore (B)	0,0	0,3	0,0	0,1
Magnésium (Mg)	0,0	0,1	0,2	0,1
Calcium (Ca)	0,0	0,0	1,8	0,2
Zinc (Zn)	0,8	1,8	0,2	0,4
Baryum (Ba)	0,0	-	0,0	-
Phosphore (P)	0,0	-	0,0	-
Polluants (ppm)				
Silicium (Si)	0,0	1,7	1,8	0,8
Sodium (Na)	0,0	0,8	0,9	1,1
Lithium (Li)	0,0	-	0,0	-
Potassium (K)	0,0	-	1,4	-

b. Interprétation :

• **Masse volumique**

La figure (4.23) présente la variation de la masse volumique à 15°C de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 en fonction du temps, la masse volumique de l'huile neuve et la valeur fixée par la spécification sont prises comme référence.

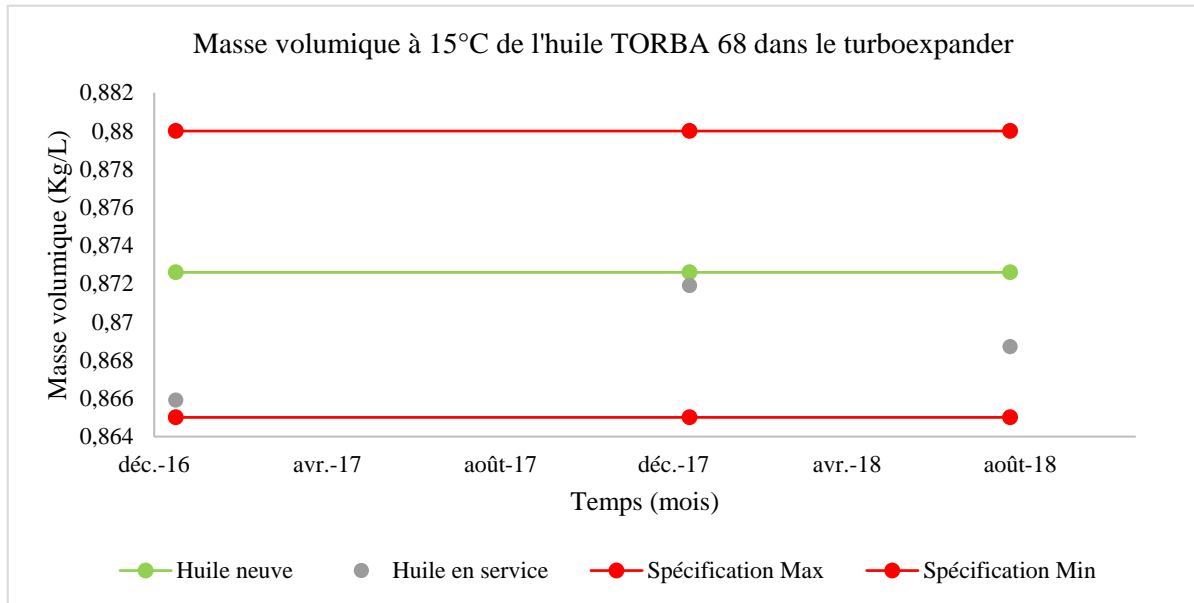


Figure4.23: Variation de la masse volumique A 15°C de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpanderEC-201.

La masse volumique de l'huile neuve et de l'huile en service répondent aux spécifications.

La masse volumique à 15 °C de l'huile en service est inférieure à celle de l'huile neuve, la diminution de la masse volumique peut s'expliquer par la dégradation de l'huile ou par la présence des particules ou des molécules légères.

• **Viscosité cinématique :**

La figure (4.24) présente la variation de la viscosité cinématique à 40°C de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 en fonction du temps, la viscosité de l'huile neuve, le niveau d'avertissement donné par la norme ASTM D6224 et la valeur fixée par la spécification sont pris comme référence.

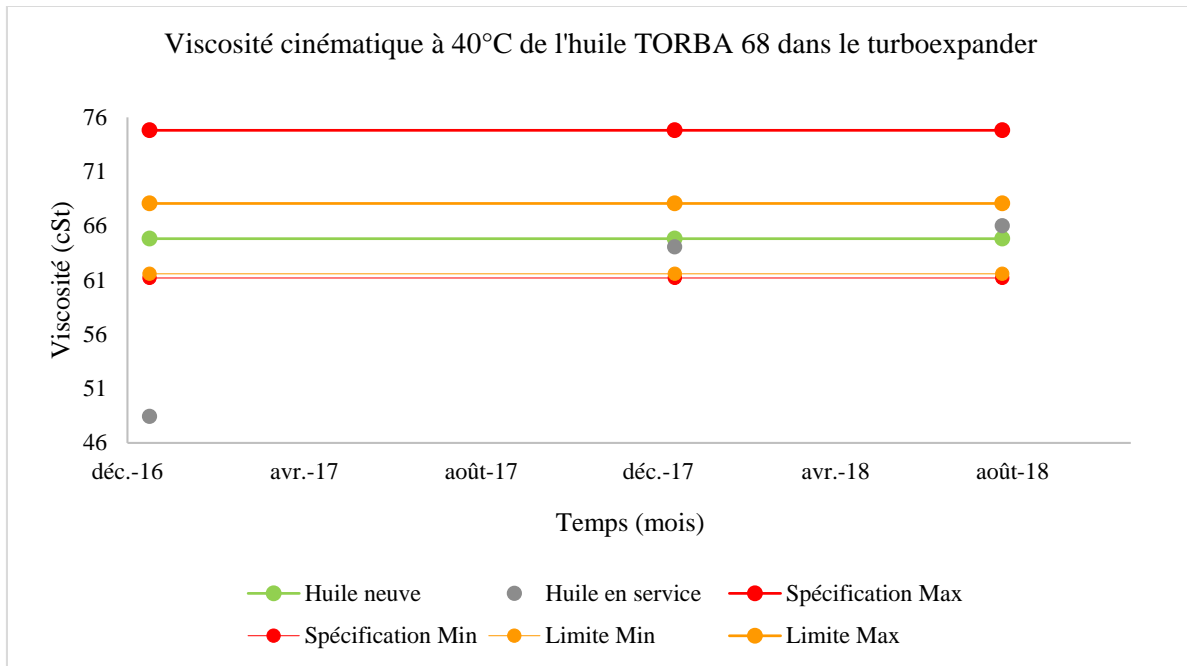


Figure 4.24: Variation de la viscosité cinématique à 40°C de l’huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.

La viscosité cinématique à 40°C de l’huile neuve répond à la spécification.

La viscosité cinématique à 40°C de l’huile en service était inférieure à l’huile neuve et inférieure à la limite et à la spécification, ensuite elle a augmenté pour atteindre la viscosité de l’huile neuve.

La figure (4.25) présente la variation de la viscosité cinématique à 100°C de l’huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 en fonction du temps. La viscosité de l’huile neuve et le niveau d’avertissement donné par la norme ASTM D6224 sont pris comme références.

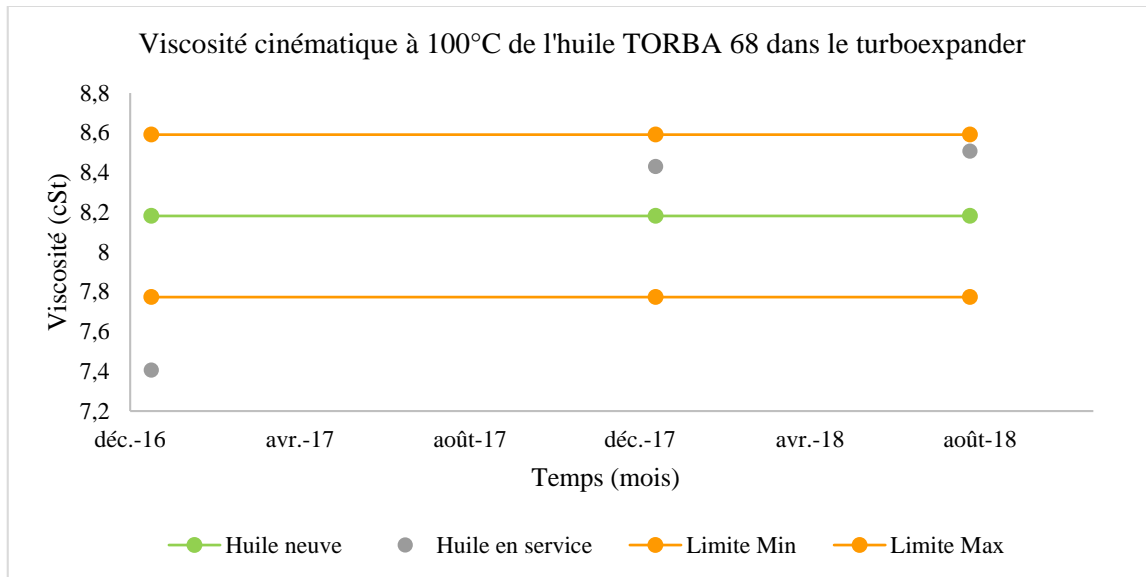


Figure 4.25: Variation de la viscosité cinématique à 100°C de l’huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.

La viscosité cinématique à 100°C de l’huile neuve ne dépasse pas les niveaux d’avertissement donné par la norme ASTM D6224.

La viscosité cinématique à 100°C de l’huile en service était inférieure à l’huile neuve, ensuite elle a augmenté pour dépasser la viscosité de l’huile neuve et s’approcher de la limite fixée par la norme ASTM D6224.

La viscosité cinématique de l’huile en service pour les deux températures répond aux spécifications donc l’huile assure une bonne lubrification sauf pour l’échantillon de décembre 2016.

- **Indice de viscosité :**

La figure (4.26) présente la variation de l’indice de viscosité de l’huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 en fonction du temps. L’indice de viscosité de l’huile neuve et la valeur donnée par la spécification sont pris comme référence.

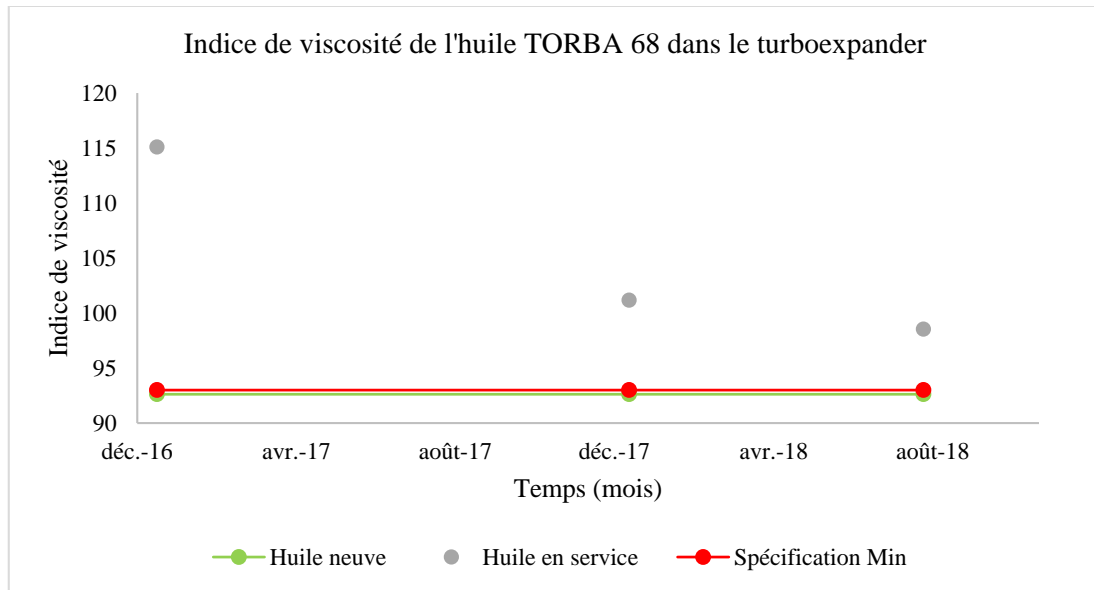


Figure 4.26: Variation de l'indice de viscosité de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.

L'indice de viscosité de l'huile neuve est légèrement inférieur à la norme, par contre celui de l'huile en service était élevé ensuite il a diminué mais il répond toujours à la norme donc la viscosité de l'huile en service résiste aux variations de température.

- **Indice d'acide (TAN)**

La figure (4.27) présente la variation du TAN de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 en fonction du temps. Le TAN de l'huile neuve et la valeur donnée par la spécification sont pris comme référence.

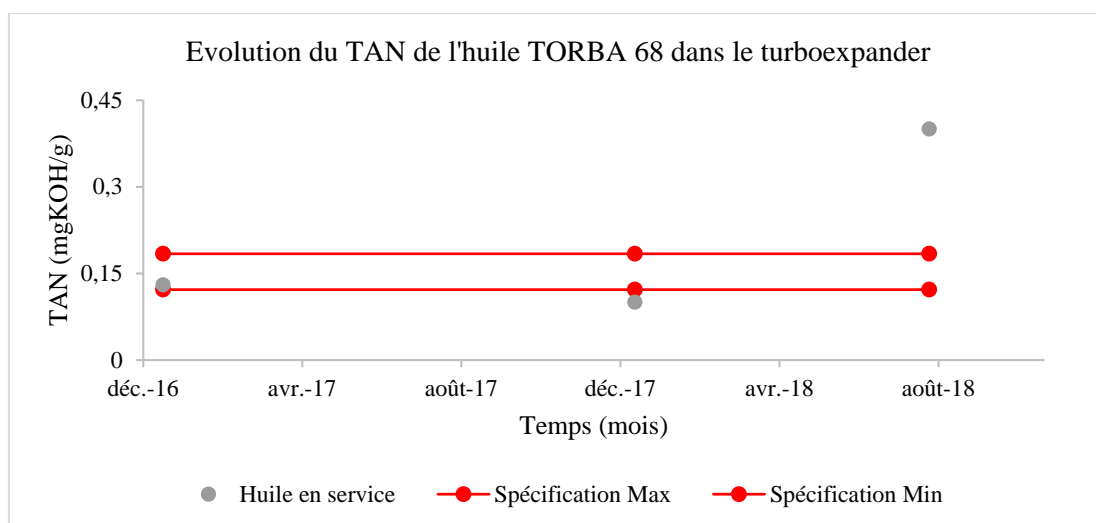


Figure 4.27: Variation de l'indice d'acide total de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.

Le TAN de l'huile en service a augmenté en fonction du temps, sa valeur pour le dernier test est hors spécifications, cette augmentation est due à la formation des produits acides dans l'huile, les produits acides peuvent provenir de la réaction de l'huile en service avec l'oxygène de l'air à une température élevée.

- **Point d'éclair**

La figure (4.28) présente la variation de point d'éclair de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 en fonction du temps. Le point d'éclair de l'huile neuve et le niveau d'avertissement donné par la norme ASTM D6224 sont pris comme référence.

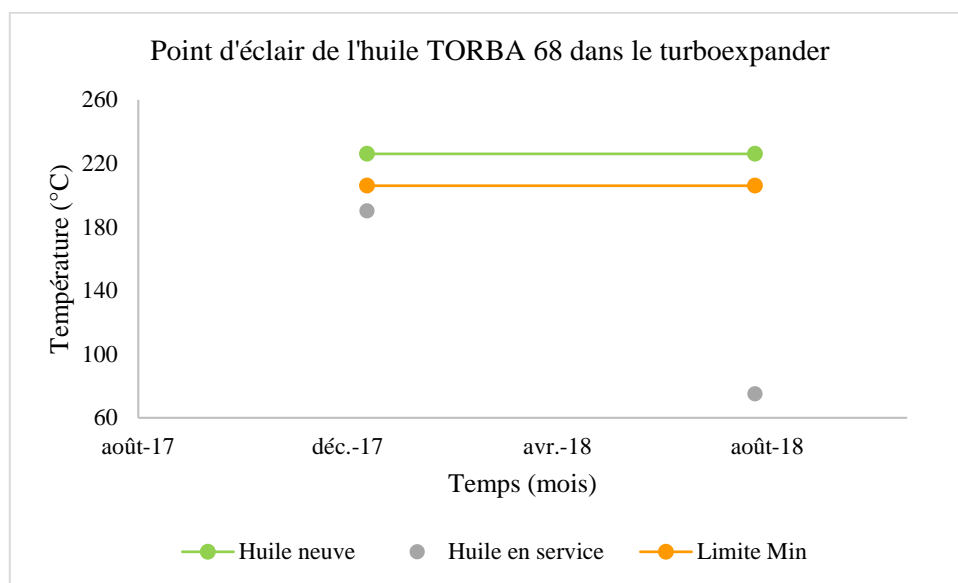


Figure 4.28: Variation de point d'éclair de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.

Le point d'éclair de l'huile en service a diminué par rapport à celui de l'huile neuve surtout pour le dernier test où sa valeur est très basse, cela renseigne sur la présence des produits légers volatiles qui ont fait que le point d'éclair a diminué ou à une contamination de l'huile par un gaz ou un liquide plus léger.

- **Point d'écoulement**

La figure (4.29) donne la variation de point d'écoulement de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 en fonction du temps (mois) ; le point d'écoulement de l'huile neuve et la valeur donnée par la spécification sont pris comme référence.

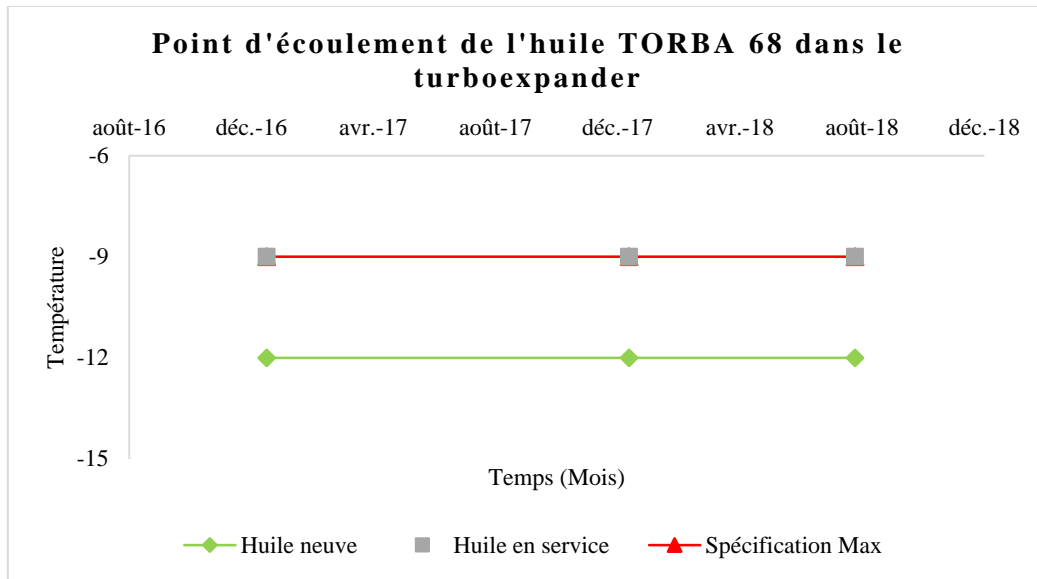


Figure 4.29: Variation de point d'écoulement de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpanderEC-201.

Le point d'écoulement de l'huile en service a augmenté, cela veut dire que l'huile a subi une contamination par des produits légers de faible point de congélation.

- **Couleur**

L'huile en service n'a subi aucun changement de couleur, sa couleur est identique à celle de l'huile neuve.

- **Corrosion à lame de cuivre**

D'après les résultats de l'examen de la lame de cuivre, l'huile en service est classée dans la catégorie « *1b* » identique à celle l'huile neuve. La catégorie *1b* indique une ternissure légère donc l'huile est très faiblement corrosive et n'a pas de caractère agressif vis-à-vis du cuivre.

- **Teneur en soufre**

L'huile neuve contient du soufre, le soufre est un constituant naturel de l'huile de base et il est aussi utilisé comme additif anti-usure, antioxydant ou comme un inhibiteur de corrosion. La quantité du soufre a diminué par rapport à celle de l'huile neuve : cela peut être expliqué par la consommation des additifs contenus dans l'huile neuve.

- **Teneur en eau**

La teneur en eau dans l'huile en service a augmenté, cela est peut être dû à la condensation de l'humidité présente dans l'air ambiant lors du refroidissement du système ou d'une entrée d'eau accidentelle dans le système lubrifié.

- **Teneur en eau et sédiments**

La teneur en eau et sédiment dans l'huile neuve est inférieure à 0,1.

Le teneur en eau et sédiments dans l'huile en service a diminuée par rapport à celle de l'huile neuve, cette diminution peut être traduite par l'élimination des sédiments par le filtre à l'huile ou à un mauvais échantillonnage.

- **Analyse des métaux**

- ❖ **Métaux d'usure**

La figure (4.30) présente l'évolution la teneur en métaux de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 en fonction du temps ; les teneurs en métaux de l'huile neuve sont prises comme référence.

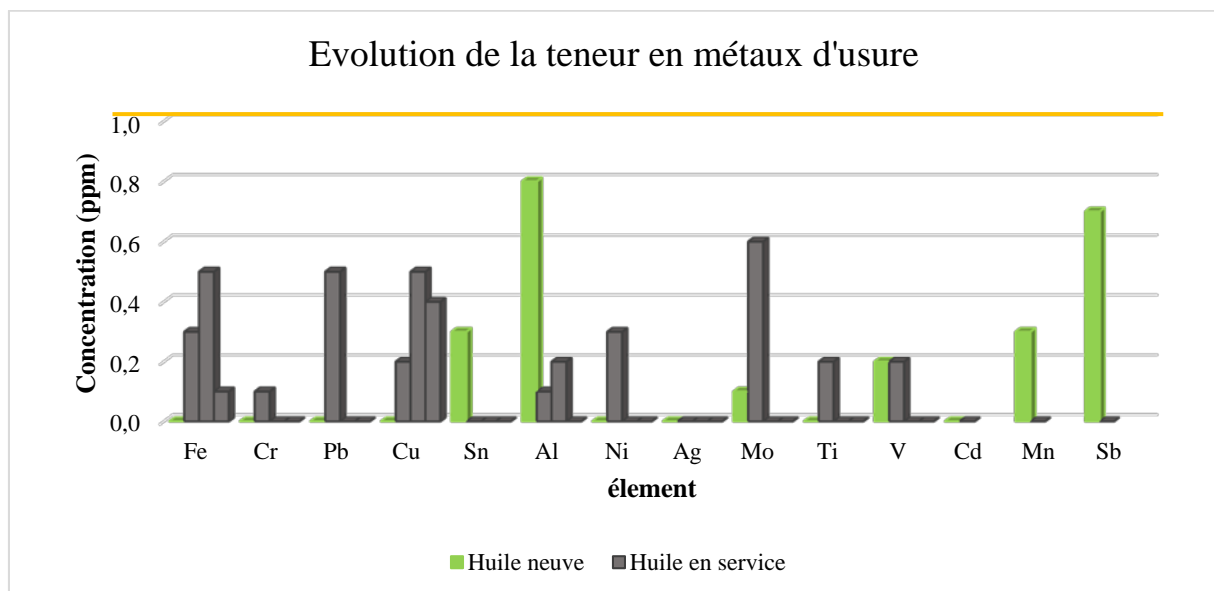


Figure 4.30 : Évolution de la teneur en métaux d'usure dans l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.

L'huile neuve et l'huile en service contiennent une faible quantité de métaux d'usure, la concentration de ces métaux ne dépasse pas 1ppm cela vaut dire que la machine est en bon état et qu'il n'y a pas eu d'usure ou de corrosion des pièces.

❖ Les additifs

La figure (4.31) présente l'évolution de la teneur en additifs de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 en fonction du temps, la concentration des additifs dans l'huile neuve est prise comme référence.

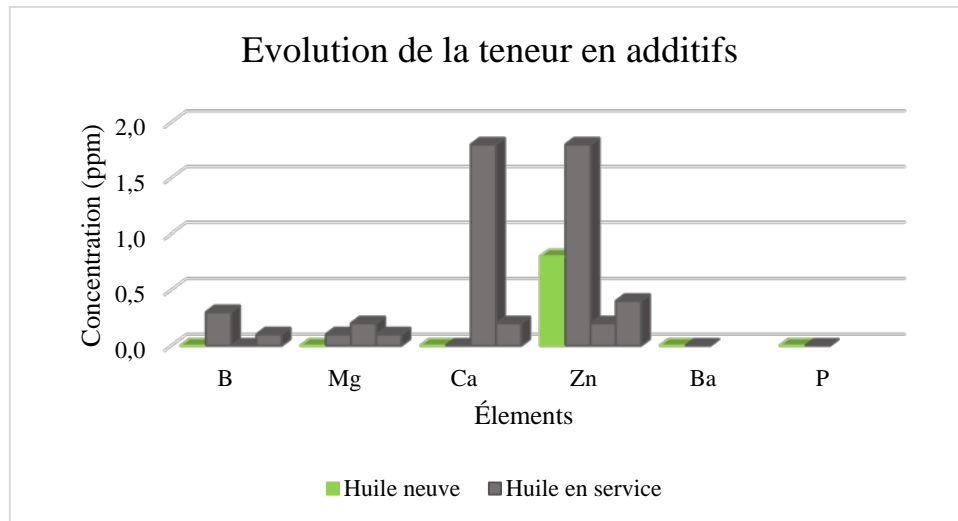


Figure 4.31: Évolution de la teneur en additifs dans l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201.

Le seul additif présent dans l'huile neuve est le zinc. Sa concentration a légèrement augmenté cela peut être dû à l'usure des métaux galvanisés dans l'huile en service.

L'huile en service contient le bore, le magnésium et le calcium, ces métaux ne sont pas présents dans l'huile neuve donc ils sont considérés comme des polluants ou métaux d'usure mais ils ne présentent aucun danger pour la machine vue leur faible concentration ne dépassant pas 2 ppm.

❖ Les polluants

La figure (4.32) présente l'évolution de la teneur en métaux de l'huile TORBA 68 en service dans le turboexpander EC-201 en fonction du temps, la teneur en métaux de l'huile neuve est prise comme référence.

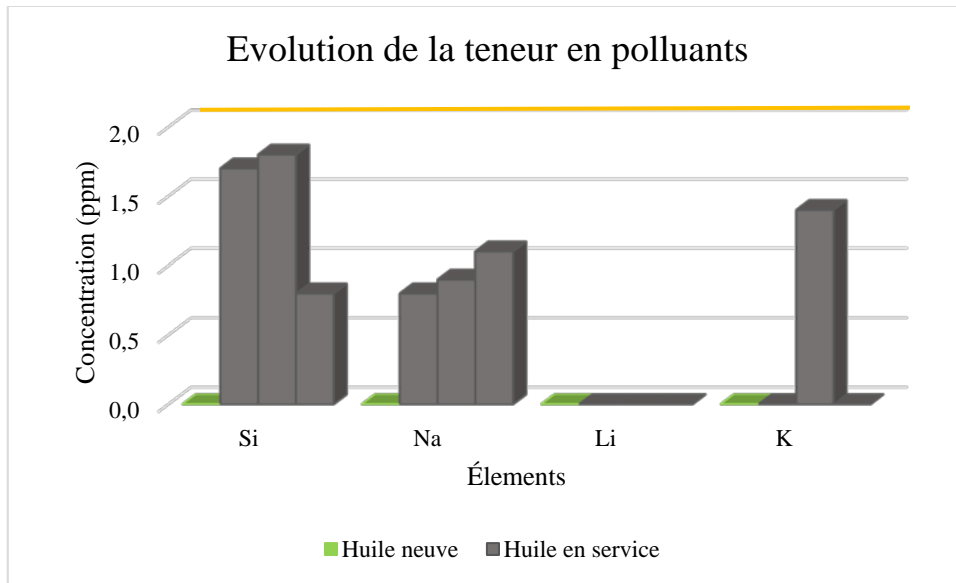


Figure 4.32: Évolution de la teneur en polluants dans l’huile TORBA 68 en service dans le turboexpanderEC-201.

L’huile neuve ne contient aucun polluant, la concentration des polluants est nulle. Par contre l’huile en service contient des traces de silicium, de sodium et de potassium (leur concentration ne dépasse pas 2ppm).

Le silicium provient des Poussières atmosphériques ou des Fluides siliconés dans les liquides de refroidissement.

Le sodium peut être dû à la présence de liquide de refroidissement dans l’huile.

Le potassium peut provenir de la présence de l’eau dans l’huile.

4.3. État des huiles en service

L'huile en service FODDA 68 a subi une forte contamination par l'eau, l'eau présente dans cette huile peut très bien réagir avec les additifs ayant une fonction ester généralement utilisés comme additifs antioxydants et anti-usure (esters phosphoriques, esters partiels d'acide succinique) provoquant la diminution de la concentration des additifs dans l'huile (phosphore) et la formation des produits acides qui expliquent l'augmentation de l'indice d'acidité et de la viscosité. L'eau peut aussi être responsable de l'usure des pièces par cavitation ceci s'explique par la présence du fer dans l'huile.

Pour l'huile TORBA 46, les conditions sévères de fonctionnement (température et pression élevées) ont conduit à la polymérisation des composés essentiels de l'huile de base. Des températures élevées peuvent amener certains de ces composés à polymériser, en donnant des composés de poids moléculaire élevé, ce qui a conduit à l'augmentation de la viscosité, de l'indice de viscosité et du point d'éclair. Il se pourrait aussi que l'augmentation de la température conduise au changement de couleur de l'huile car une simple hausse de la température favorable aux réactions d'oxydation peut provoquer des changements de couleur de l'huile.

L'huile TORBA 68 a dû subir une contamination par un gaz ou un composé léger, la présence de composés légers plus volatils conduit toujours à la diminution du point d'éclair et du point d'écoulement et peuvent aussi être la cause de la formation de produits acides

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de ce projet de fin d'étude, nous avons étudié les causes et les effets de la contamination sur les propriétés physico-chimiques de trois types d'huiles en service dans trois équipements différents.

Les résultats de l'analyse des propriétés physico-chimiques et la spectroscopie ont montré que la contamination des huiles en service conduit effectivement au changement des propriétés des huiles et que les conditions sévères de fonctionnement peuvent être la cause de la dégradation des huiles en service. Les principaux résultats de cette étude peuvent être résumés comme suit :

- La présence de l'eau dans les huiles en service conduit à l'hydrolyse de certains additifs, les produits de l'hydrolyse sont des produits acides qui peuvent être la cause du changement des propriétés les plus importantes des huiles comme l'augmentation de la viscosité et l'indice d'acide total ainsi que l'usure des pièces lubrifiées.
- Les conditions sévères de fonctionnement (température et pression élevés) conduisent à la dégradation des huiles en service.
- La contamination par un gaz ou un produit léger diminue les propriétés thermiques des huiles en service.

L'analyse des huiles peut donner des informations sur l'état de l'huile et l'état de l'équipement, néanmoins, l'analyse par spectroscopie des huiles ne donne que des informations partielles ; elles ne donnent pas la taille et la forme des particules présentes dans l'huile en service. D'autre part, nous ne connaissons pas l'âge de l'huile en service examinées ni la métallurgie des pièces lubrifiées. Nous ne pouvons donc pas établir un diagnostic fiable et précis pour la gestion de la maintenance prédictive.

Les résultats d'analyses nous ont permis d'établir d'une manière générale l'origine des contaminations sans pouvoir nous prononcer sur l'opportunité de remplacer des huiles en service ou de procéder à l'arrêt des machines pour une inspection des pièces usées et leur remplacement éventuel avant une panne qui peut entraîner plus de détérioration et des coûts plus importants.

Pour des travaux futurs, et dans un souci d'amélioration l'interprétation des résultats et dans le but de faire un diagnostic fiable et précis, il serait souhaitable de :

CONCLUSION GÉNÉRALE

- Compléter l'analyse des huiles par la ferrographie et le comptage des particules qui donnent des informations sur la taille et la forme des particules d'usure ainsi que la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier IRTF qui donne le degré d'oxydation des huiles.
- Donner des informations sur le circuit de lubrification des machines et la métallurgie des pièces lubrifiées pour connaître les pièces qui s'usent et pour pouvoir procéder à un remplacement des organes de la machine sur la base de l'usure détectée par la présence de métaux dans l'huile.
- Donner les heures de marche de l'huile pour pouvoir se prononcer sur le remplacement ou l'appoint d'huile et se conformer aux manuels d'entretien de ces machines que nous n'avons pas eu à notre disposition.

BIBLIOGRAPHIE

Association française des techniciens du pétrole. Les lubrifiants industriels. Paris : ÉDITION TECHNIP. Année 1974. Pages 7, 8.

ASTM D664. Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration. Année 2004. Pp 2.

Audibert. F. Les huiles usagées : Raffinage et valorisation énergétique. Paris : ÉDITION TECHNIP. Année 2003. Pp 10-14.

Ayel .J. Les lubrifiants : propriétés et caractéristiques. *Technique de l'ingénieur*. B5340. Année 1996. Pp 21.

Ayel. J, Born. M. Lubrifiants et fluides pour l'automobile. Paris : ÉDITION TECHNIP. Année 1998. Pp 43,80.

Bhushan. B. Introduction to tribology. 2ème edition. United Kingdom, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. Année 2013. Pp 400-403

Boucheriet.H, Lahmar, Bensouilah. H, Mouassa. Étude des effets de la pollution solide des huiles lubrifiantes sur les performances statiques des paliers hydrodynamiques des machines tournantes. Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution. Constantine. Octobre 2016. Pp 2, 3.

Bouillon. V. Overview of oxidation laboratory tests on industrial lubricants – Lubmat. BfB Oil Research S.A – IESPM GROUP Les Isnes, Namur, Belgium 2016. Consulté le 24/03/2019. Disponible sur: <<http://www.iespm-group.com/pdf/Overview-of-oxidation-laboratory-tests-on-industrial-lubricants.pdf>>

Boulanger. A., Vers le zéro panne avec la maintenance conditionnelle, Paris : AFNOR, Paris, Année 1988.

Brunetière. N. Introduction à la tribologie. Institut Pprime – Futuroscope. Année 2016.

Consulté le 01/04/2019. Disponible sur :

<http://blogs.univpoitiers.fr/noelbrunetiere/files/2015/12/tribologie_brunetiere_2016.pdf>

Castrol. ABC du graissage : Structure, Utilisation et propriétés des lubrifiants. Switzerland. Avril 2006. Pp17.

BIBLIOGRAPHIE

Chapelot. M. (EMS) et Richard A. Consultants au CETIM «surveillance des machines tournantes». Guide d'achat Mesures, Septembre 2003, N° 757.

Chitour. C-E. Raffinage : Les propriétés physiques des hydrocarbures et des fractions pétrolières. Tome I. Alger : Office des publications universitaire. Année 1997. Pp74-75.

Denis. J, Briant. J, Hipaux J-C. Physico-chimie des lubrifiants : analyses et essais. Paris : ÉDITION TECHNIP .Année 1997. Pp 109, 111, 112, 127, 131, 132,138.

Directive environnementale sur les huiles usagées et les combustibles résiduaires, ministère de l'environnement. Canada : Nunavut. juin 2012, p.9-10.

Duchemin. G, Technique de l'ingénieur : maintenance des machines et des moteurs, 2017, BM4188, p. 4.

Eachus, Alan C. Water: water everywhere nor any drop to drink. Tribology & Lubrication Technology, October 2005, p. 33-39.

Evan John S. Comment l'huile se dégrade-t-elle ? Bulletin technique, wearcheck. 2016. Numéro 52, p. 3.

Evans John S. L'augmentation et la diminution de la viscosité. Bulletin technique, wearcheck, 2016. Numéro 38, pp. 3.

Garvey .R, Foge. G. Water content in oils: moisture in solution, emulsified water, and free water. *Technology Showcase: Integrated Monitoring, Diagnostics and failure Prevention Estimating*. Alabama, April 22-26, 1996, p. 3. Consulté le 26/02/2019. Disponible sur : <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/p010178.pdf>>

Giroud. JC (les lubrifiants). En quoi consiste le comptage des particules. Consulté le : 16/04/2019. Disponible en ligne sur : <<http://leslubrifiants.unblog.fr/2016/07/07/en-quoi-consiste-le-comptage-de-particules/>>

Giroud. JC (les lubrifiants). Lubrifiants : la classification des huiles moteur (fluidité) (niveau de performance). Consultée le 30/03/2019. Disponible sur : <<http://leslubrifiants.unblog.fr/2014/08/28/lubrifiants-la-classification-des-huiles-moteur-fluidite-niveau-de-performance/>>

Gouriveau .R, Medjaher .K, Zerhouni .N. Du concept de PMH à la maintenance prédictive 1 : surveillance et pronostic. ISTE Edition, London, 2017, volume 3, p. 19-20.

BIBLIOGRAPHIE

Groff J.L.F. ABC du graissage. Paris : ÉDITION TECHNIP. Année 1961.

Hachemi .M. *Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes.* Mémoire de fin d'étude : Maintenance industrielle. Tlemcen : Université Abou BekrBelkaid 07, 2012. [Consultée 15/05/2019]. Disponible en ligne sur : <<http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/9520/1/MS.Hyd.Hachemi.PDF.pdf>>.

Harika .E. Impact d'une pollution des lubrifiants par de l'eau sur le fonctionnement des organes de guidage des machines tournantes. Thèse de doctorat : Génie Mécanique, Productique, Transport. Université de Poitiers. Année 2011, pp 12-16.

Heintz Émilie et al. Technique de l'ingénieur : la maintenance : un levier du développement durable, 2018, AG502, p. 2.

Heng .J. *Pratique de la maintenance préventive : mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, froid.* 3^{ème} édition. Paris : DUNOD. Année 2011, pp 3. Technique et ingénieur. Série gestion industrielle.

Hunt T. M. Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection in Liquids. London : Elsevier Applied Science. Année 1993. pp488.

John S. Evan. Comment l'huile se dégrade-t-elle ? .Bulletin technique. Wear check. Numéro 52. Année 2016. Page 3

Laurent. G. *Modèle prédictif pour le développement d'un système embarqué de vidange des lubrifiants pour transmission.* Thèse de doctorat : génie mécanique. Québec : l'Université Laval. mars 2000.

Ligier J.-L. Lubrification des paliers moteurs. Paris : ÉDITION TECHNIP. Année 1997. Pp 45,46.

Macuzic. I, jermic. B. Proactive Approach to Oil Maintenance Strategy. *Tribology in industry* [en ligne]. 2004, vol. 26, n° 1&2, p28 [consulté le 15/05/2019]. Disponible sur : <http://www.tribology.rs/journals/2004/1-2/5.pdf>

Mayer Ashley. Notions de base pour les débutants (partie 1) ou les tests et ce qu'ils nous enseignent. Bulletin technique, wearcheck, 2016. Numéro 19.

BIBLIOGRAPHIE

Mayer Ashley. Notions de base pour les débutants (partie 2) ou les tests et ce qu'ils nous enseignent. Bulletin technique, wearcheck, 2016. Numéro 20.

McGuire .N. Tribology & lubrication technology. Tiny Bubbl. Février 2015, p. 35.

Mobley .K. An introduction to predictive maintenance, 2ème édition. USA : Elsevier Science. Année 2002. pp. 4, 5.

Morel .J. Surveillance vibratoire et maintenance prédictive. Technique de l'ingénieur, r6100 Année 2002. Pp 2.

Richar.J, Roux, F. Les lubrifiants. *Techniques de l'ingénieur*. Année 1990. B590.

Schilling. A. Les huiles pour moteurs et les graissages des moteurs. Tome I et II. Paris : ÉDITION TECHNIP. Année 1976.

Thomas .M. Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines, Canada. Press de l'université du Québec, 2012, p. 131, 165, 166,171.

TOTAL LUBRIFIANTS, Industrie & Spécialités, ANAC INDUS. 02/02/2010. Consulté le 04/04/2019. Disponible en ligne sur :

<http://total.link.be/be/B2B_LUB_INDUS_FR/ANAC_INDUS_FR.pdf>

Totten, George E., Fuel and lubricants: technology, properties, performance and testing, 2003, ASTM International, USA, 2003.

Ville .F. Pollution solide des lubrifiants : indentation et fatigue des surfaces. Thèse de Docteur Ingénieur. Lyon : Institut National des sciences appliquées. Année 1998.Pp 30-32.

Wauquier J.-P. Pétrole brute produits pétroliers schémas de fabrication. Paris: ÉDITION TECHNIP. Année 1994. Pp 285-291.

Wright. J. Air Contamination and Its Effects on a Machine's Reliability. Noria Corporation, November 2008, Consulté le 23/05/2019. Disponible en ligne sur : <<https://www.machinerylubrication.com/Read/1723/air-contamination>>

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche technique de l'huile TORBA :

Les huiles TORBA sont spécialement élaborées pour répondre aux exigences de lubrification des paliers de turbines à vapeurs et gaz, ainsi que de nombreux organes rattachés à leurs technologies. (Multiplicateurs, certains circuits de régulation, circuits hydrauliques annexes...). Ces huiles sont également utilisées pour la lubrification des turboalternateurs et turbo compresseurs.

Propriétés des huiles TORBA :

- Pouvoir anti-rouille.
- Très bonne résistance à l'oxydation, ce qui assure une durée de vie importante des charges en service
- Bonne résistance à la corrosion
- Très bonne désemulsibilité
- Bon pouvoir de désaération.

Tableau : Caractéristiques moyennes

	Norme	Unité	TORBA 32	TORBA 46	TORBA 68
Classe ISO VG			32	46	68
Viscosité à 100°C	D445	cSt	5,5	6,6	8,3
Indice de viscosité	D2270		95/100	95/100	95/100
Point d'éclair °C	D92	°C	200	210	222
Point d'écoulement (°C)	D97	°C	-9	-9	-9

Annexe 2: Tableau- Warning Levels of In-Service Oil Test Data ASTM D6224

Test	GearOils	HydraulicOils	Diesel EngineOils	Turbine/ CirculatingOils	Air CompressorOils ^A	ECPO ₄ Esters)	EHC Min.Oils
Appearance	Heavy, cloudy, visible debris. Not clear and bright.						
Viscosity	±5 % of new oil, max.	±5 % of new oil, max.	±10 % of new oil, max.	±3 % of new oil, max.	±5 % of new oil, max.	±10 % of new oil, max.	±5 % of new oil, max.
AcidNumber	increase of 0.5 mgKOH/g	increase of 0.2 mgKOH/g		increase of 0.2 mg KOH/g	increase of 0.2 mg KOH/g	>0.2 mgKOH/g	increase of 0.2 mgKOH/g
Water ^B	>0.1 % by mass	>0.05 % by mass	>0.2 % by mass	>0.05 % by mass		>0.1 % by mass	>0.05 % by mass
Antioxidants		<20 % by mass		<10 % by mass, <20 % by mass			10 % by mass <20 % by mass
Oxidationstability(RPVT)				<25 % of new ^C			<25 % of new ^C
Color		unusual or rapid darkening		unusual or rapiddarkening			
API gravity						±0.01 API	
Flash point			decrease of 30 °C	decrease of 20 °C from new oil			
Insolubles	>0.5 % by mass	>0.1 % by mass	>2.5 % by mass (pentane) >2.0 % by mass (toluene)	>0.1 % by mass			
Insolubles color bodies (MPC) ^D	30 ΔE			30 ΔE		Report	Report
Water separability ^E				>30 min ^E			>30 min
Rust evaluation	light fail			light fail			light fail
Foamingcharacteristics (Sequence I)	tendency>450, stability>10			tendency>450 stability>10		tendency>450 stability>10	tendency>450 stability>10
Air release (50°C)		>5 to 20min ^F		>5 min to 20 min ^F		>10 min	
Base number			<20 % of new oil				
Chlorine						>100 µg/g	
Resistivity						<5 × 10 ⁹ ohm/cm	
Mineraloil						>1 % by mass	
Glycol		>1 % by mass	anydetected				
Particlecounts (ISO Code)	<i>H</i>	17/14 max.		17/14 max.			
Wear metals	/	/	/	<10µg/gtotal		<10 µg/g total	
Additive elements	±25 % of new oil						
Microbial contamination	Ten-fold increase above established norms ^J						

A Does not include refrigeration (chiller) oils or synthetic compressor fluids.

B The maximum acceptable amount of water depends on the type of equipment and service.

Reduced component life is generally correlated with greater amounts of water in the oil.

C Some oils may undergo degradation leading to insoluble contaminants and deposit formation prior to reaching the warning limits (for example, the 25 % RPVOT warning limit) suggested causing problems such as filter plugging, servo-valve sticking or bearing deposits. This issue appears to be most prevalent in large frame industrial gas turbines, especially those used in peak-loaded or cyclical modes, as well in some types of steam turbines. Under these circumstances, close monitoring of the oil cleanliness by particle count particularly those particles in the less than or equal to 4 micron range or incorporating additional tests that detect soft deposits formation such as sludge or varnish, or both, should be included as part of a condition monitoring program to provide a potential warning.

D Some turbine systems or certain types of turbine fluid respond differently, making an MPC patch value by itself may not indicate good or bad fluid health. One should check the actual hardware in the system for signs of deposits, varnish, and sludge, or consult with your lubricant fluid suppliers.

E This represents the time required to reach the endpoint in Test Method D1401 (#3 mL emulsion). The suggested limit only apply to steam turbines.

F The maximum air release time depends on the oil viscosity.

G The maximum amount of tolerable fuel oil dilution depends on the type of diesel engine.

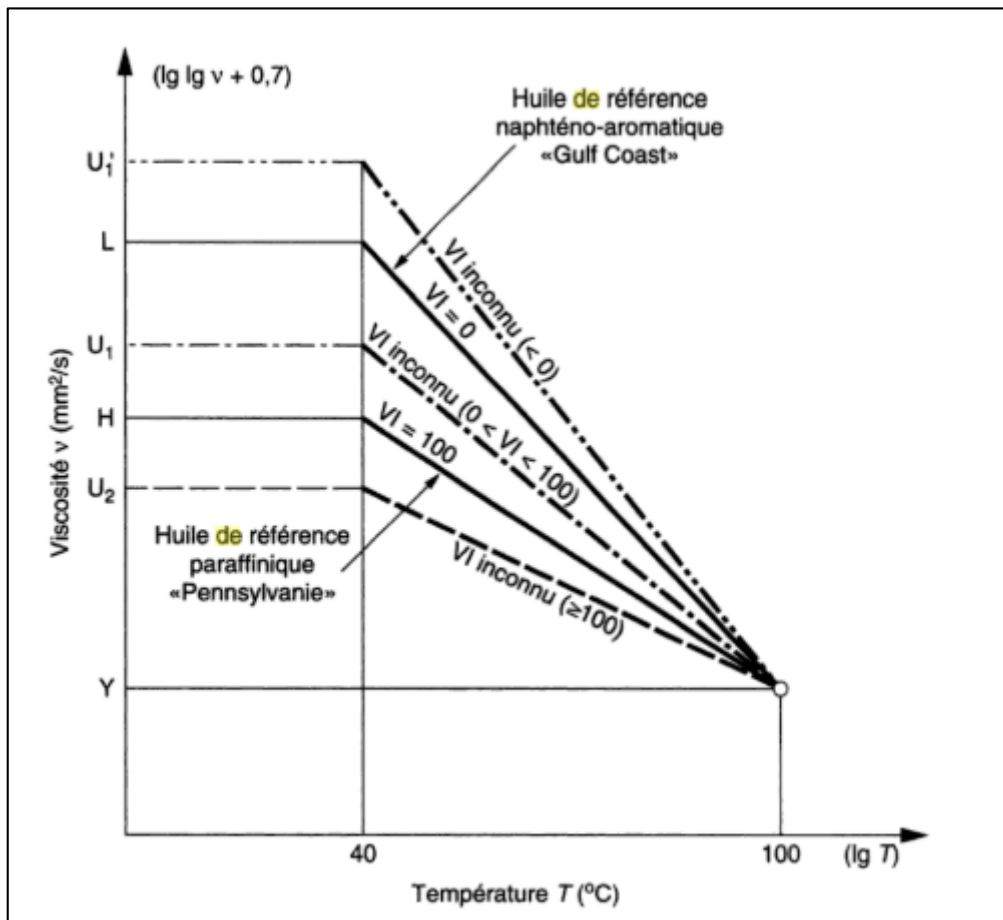
H The warning level ranges from --/18/15 to --/22/18 depending on the application.

Longer component life is generally correlated with the cleanliness of the system.

I Are commended warning level is a concentration of two standard deviations above theme of six or more prior results. In cases where there are insufficient analysis results to provide a good baseline or in cases where the increase in concentrations is steady but gradual, the equipment manufacturer should be consulted for guidance.

J Microbes are ubiquitous in many environments and there are no universally accepted limits for microbial contamination in oils. The levels of contamination which can be tolerated will depend on the system and the type of microbial contamination. Microbes will generally be far more numerous in low point samples and samples containing water. For routine microbiological monitoring, baseline contamination levels should be established for designated sample points, which should include a system low point and a representative sample of circulating oil (before any filters or centrifuges). A ten-fold increase in microbial counts should highlight that microbial growth may be occurring. Typically, microbial counts of over 1000 microbes per milliliter of oil in low point samples or over 100 microbes/mL in representative samples of circulating oil indicate contamination levels are above normal back ground level. Counts ten times these levels could indicate a potential for microbial related operational problems.

Annexe3: Courbe de viscosité /température (Ayel et Born, 1998)



$$\text{Pour VI} < 100 : \text{VI} = \frac{L-H}{L-U} * 100$$

$$\text{Pour VI} \geq 100 : \text{VI} = \frac{10^N}{0,00715} + 100 \text{ avec : } N = \frac{\lg H - \lg U}{\lg Y}$$

Avec :

IV : indice de viscosité.

U : viscosité cinématique à 40°C de l'huile testée [mm²/s].

L : viscosité cinématique à 40°C de l'huile de référence d'indice 0 [mm²/s].

H : viscosité cinématique à 40°C de l'huile de référence d'indice 100 [mm²/s].

Annexe 4 : Nature de corrosion des lames de références (ASTM D130-12)

Classification	Désignation de la lame	Description
Fraîchement polie		
1	Ternissement léger	a. Orangé léger presque semblable à la lame fraîchement polie. b. Orange foncé
2	Ternissement modéré	a. Rouge bordeaux b. Lavande c. Colorations multiples : bleu lavande et, ou argent sur rouge bordeaux d. Argenté e. Bronzé ou doré
3	Ternissement foncé	a. pellicule magenta sur la bronzée b. colorations multiples : présence de rouge et de vert (irisation) mais pas de gris
4	Corrosion	a. noir transparent, gris foncé ou brun avec du vert irisé découvert b. noir graphité ou mat c. noir brillant