

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université M'hamed Bougara - Boumerdès

Faculté des Technologie

Département Génie des Procédés

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de MASTER II

Filière : GENIE DES PROCEDES

OPTION : Génie Chimique

THEME

Les huiles lubrifiantes dans les machines tournantes

Présenté par :

- Mr BELAID Abderrezak

Promoteur :

Pr- H.AKSAS

Promotion 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant, de m'avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience afin de pouvoir terminer ce modeste projet de fin d'étude.

Je tenais à vous adresser ma profonde gratitude à mon promoteur et qui est aussi le chef de département Mr AKSAS Hamouche pour ses conseils, sa disponibilité et son encouragement durant toute la période de mon projet.

Je tenais à remercier sincèrement Mme KHADER Wafia pour tout le soutien, son aide ainsi que pour ses conseils pour réussir ce projet.

Mes remerciements à tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour,

Le respect, la reconnaissance....

Aussi c'est tout simplement que

A ma mère

A ma très chère mère **Sadjia**, Aucun mot ne pourra exprimer l'affection et l'amour que je prouve envers vous. Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvert de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Que dieu vous procure santé, prospérité et bonheur

A la **mémoire** de mon très cher père **Abdelmadjid**, que je n'oublierais jamais. Ce travail est le résultat de l'esprit, de sacrifice dont vous avez fait preuve, de l'encouragement et le soutien que vous ne cessez de manifester, j'espère que vous y trouverez les fruits de votre semence et le témoignage de ma grande fierté de vous avoir comme père. Allah yarhmak

A ma sœur : Soraya, Je te dédie ce travail pour l'amour que tu m'as toujours donné, tes encouragements et toute l'aide que tu m'as apportée durant mes études, ainsi à ton mari redouane. Ainsi à mes belles sœurs Samia et Hanane.

A mes frères : Mohamed, mon Grand frère et mon 2eme père, un grand Merci pour tout ce que tu m'as apporté dans la vie, que dieu te garde pour nous et pour ta petite famille et vous procure le tout bonheur du monde. Hamza, mon ami, mon bras droit. Merci pour votre soutien, votre compréhension et vos encouragements.

A ma très chère femme : Yasmine, Je te dédie ce travail pour ta présence et pour tes sacrifices et encouragements durant toutes ces années, sans toi ce travail et pleins d'autres choses n'auraient jamais pu être réalisés.

A mes nièces adorées : Douaa, Bessma, Aya, Tasnime, Raouane

A mes neveux : Anes, Assil

A mes meilleurs amis : Amine, Adel, Lyes, Zakaria

A mes amis(es) et mes proches

Je vous dédie ce modeste travail, avec tous mes souhaits de bonheur, réussite et bonne santé.

A tous qui sont chers et que j'ai omis involontairement de citer...

Abderrezak

List des abréviations

Cl : chlore
I : Iode
P : Phosphore
As: Arsenic
Si : Silicium
Na: Sodium
Fe : Fer
C° : Degré celsius
EP : Extrême pression
AW: Anti-War
B2O3: Oxyde de bore

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Le pétrole	
I.1. Le pétrole.....	2
I.1.A. Introduction.....	2
I.1.B. Définition de pétrole brut.....	2
I.1.C. Origine de pétrole brut.....	2
I.1.D. Composition du pétrole brut.....	3
I.1.D.1. Les paraffines.....	3
I.1.D.2. Les naphènes.....	3
I.1.D.3. Les aromatiques.....	3
I.2. Distillation du pétrole.....	4
I.2.A. Introduction.....	4
I.2.B. Distillation atmosphérique.....	4
I.2.C. Distillation sous-vide.....	4
I.2.D. Description de la colonne de distillation atmosphérique.....	5
I.2.D.1. Zone d'alimentation ou zone de flash.....	5
I.2.D.2. Zone de rectification.....	5
I.2.D.3. Zone d'épuisement.....	5
I.2.E. Les dérivés du pétrole.....	6
Chapitre II : Les huiles lubrifiantes	
II.1. Introduction.....	9
II.2. Définition de la lubrification.....	9
II.3. Les huiles lubrifiantes.....	9
II.4. Composition d'une huile lubrifiante.....	9
II.4.A. Les huiles de Bases.....	10
II.4.A.1. Les huiles minérales.....	10
II.4.A.2. les huiles de semi synthèse.....	10
II.4.A.3. Les huiles de synthèse ou synthétiques.....	10
II.4.B. Les additifs.....	11
II.4.B.1. Les additifs extrême-pressure.....	11
II.4.B.2. Les additifs antioxydants.....	11
II.4.B.3. Additifs anti-mousse.....	11

II.4.B.4. Les Détergents.....	12
II.4.B.5. Inhibiteurs anticorrosion.....	12
II.4.B.6. Les dispersants.....	12
II.4.B.7. Les additifs à effet polaire.....	12
II.4.B.8. Les additives anti-usures.....	12
II.5. Classification des lubrifiants.....	13
II.5.A. Lubrifiants d'origine animale.....	13
II.5.B. Lubrifiants d'origine minérale.....	13
II.5.C. Lubrifiants d'origine végétale.....	13
II.5.D. Lubrifiants d'origine synthétique.....	13
II.6. Propriétés des huiles.....	14
II.6.A. Propriétés physiques.....	14
II.6.A.1. Densité.....	14
II.6.A.2. Couleur.....	14
II.6.A.3. Chaleur massique.....	14
II.6.A.4. Conductivité thermique.....	14
II.6.A.5. Viscosité.....	14
II.6.A.6. Indice de viscosité.....	16
II.6.A.7. Compressibilité.....	16
II.6.A.8. Coefficient de viscosité-pression.....	17
II.6.A.9. Point d'écoulement.....	17
II.6.B. Propriétés chimiques.....	18
II.6.B.1. Point d'éclaire.....	18
II.6.B.2. Température d'auto-inflammation.....	18
II.6.B.3. Détergence, dispersivité.....	18
II.6.B.4. Teneur en cendres.....	18
II.6.B.5. Teneur en soufre.....	18
II.6.B.6. Teneur en eau.....	19
II.7. Fonctions des lubrifiants.....	19
II.7.A. Refroidir.....	19
II.7.B. Etancher.....	19
II.7.C. Nettoyer.....	19
II.7.D. Lubrifier.....	19
II.8. Contamination des lubrifiants.....	20
II.8.A. Taille.....	20

II.8.B. Surface extérieure.....	20
II.8.C. Formes.....	20
II.8.D. Dureté.....	21
II.8.E. Densité.....	21
II.8.F. Composition chimique.....	21
II.8.G. Polarité.....	21
II.8.H. Propriétés magnétiques.....	21
II.8.I. Conductivité électrique.....	22
II.8.J. Nombre.....	22
II.8.K. Le coût des dégâts.....	22

Chapitre III : Les machines tournantes

III.1. Turbine hydraulique.....	22
III.1.A. Définition.....	22
III.1.B. Naissance des turbines hydrauliques.....	22
III.1.C. Différents types des turbines hydrauliques.....	25
III.1.C.1. Les turbines à Action.....	25
III.1.C.2. Turbine Pelton.....	25
III.1.C.3. Turbine Crossflow.....	26
III.1.C.4. Turbine à Réaction.....	26
III.1.C.5. Turbine Francis.....	27
III.1.C.6. Turbines hélice et Kaplan.....	27
III.2. Les compresseurs.....	29
III.2.A. Introduction sur les Compresseurs.....	29
III.2.B. Classification des compresseurs.....	29
III.2.C. Principe de fonctionnement.....	30
III.2.D. But de la compression.....	31
III.2.E. Conditions de fonctionnement.....	31

Références bibliographique

Liste des Tableaux

<i>Tableau I.1. Les produits dérivés du pétrole.....</i>	<i>4</i>
<i>Tableau II.1. des exemples de familles d'huiles de synthèse.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau II.2. viscosité de l'eau et de l'huile.....</i>	<i>15</i>

Liste des Figures

<i>Figure I.1. Distillation atmosphérique et sous vide.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure II.1. Composition d'une huile lubrifiante.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure II.2. Indice de viscosité.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure III.1. Turbine hydraulique et générateur électrique.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure III.2 La turbine radial et centrifuge Fourneyron.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure III.3. La turbine radiale centripète FRANCIS.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure III.4. Turbine Pelton.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure III.5. Turbine GIRARD.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure III.6. Turbine Hélice.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure III.7. Turbine Kaplan.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure III.8. Classification les compresseurs.....</i>	<i>28</i>

Résumé

Résumé

Les huiles lubrifiantes sont des liquides visqueux utilisées pour la lubrification des moteurs et des machines, elles sont obtenues à partir de la distillation des produits lourds du pétrole. La lubrification est l'introduction d'une pellicule d'huile ou de graisse entre les pièces mobiles des machines tournantes.

Les lubrifiants préviennent le contact des pièces ce qui permet les surfaces de glisser l'une sur l'autre sans se toucher, on prévient ainsi l'usure des pièces qui bougent en douceur. L'huile sert également à dissiper une certaine partie de la chaleur produite par les pièces lorsque le fonctionnement de la machine à un régime élevé, elles préviennent aussi la corrosion car elles forment une barrière matérielle contre l'humidité. Ces matières dégradent après un certain temps d'utilisation à cause de : Contamination, oxydation ou usure des matériaux.

Abstract

Lubricating oils are viscous liquids used for the lubrication of engines and machines, they are obtained from the distillation of heavy petroleum products. the lubrication is the introduction of a film of oil or grease between the parts mobile.

The lubricants prevent the contact of the parts, which allows the surface to slide on one other without touching, thus preventing the wear of the parts which move smoothly. The oil also serves to dissipate some of the heat produced by the parts when the machine operates at a high speed; lubricating oils also prevent the corrosion because they form a metal barrier against moisture. These materials degrade after a certain period of use due to: metal contamination, oxidation or wear.

Introduction générale

Introduction générale

Un moteur ou une machine quelconque en cas du mouvement soumis des frottements entre ces pièces mobiles ainsi qu'une augmentation de la température, ceci avec le temps conduit à un endommagement de ces pièces et de la machine en général.

Pour cela, les spécialistes ont essayé pendant des siècles d'inventer des matières et des substances pour éliminer ou bien minimiser ces problèmes, ces matières sont appelées les huiles lubrifiantes.

Les huiles lubrifiantes sont des liquides visqueux obtenus par la distillation du pétrole brut composées d'une huile de base (huile minérale ou huile de synthèse) et un ou plusieurs additifs (détergent, dispersant, anti oxydant...).

Elles ont pour but :

- Lubrification: réduction du frottement et de l'usure
- Refroidissement: suppression de la chaleur générée par le frottement et de la chaleur de procédé
- Protection contre la corrosion
- Préservation de la propreté : suppression des débris d'usure et de la contamination
- Étanchéité.

Comme ces huiles ont des avantages, elles ont aussi des inconvénients par exemple : La pollution, la contamination et la dégradation.

Cette partie bibliographique qui est classée en trois chapitres concerne à donner des définitions et d'origine des huiles lubrifiantes ainsi que leur principales caractéristiques et les machines industrielles, leur applications et fonctionnement.

Chapitre I

Le pétrole

Le pétrole

I.1. Pétrole brut

I.1.A. Introduction

Le pétrole brut est un fluide constitué principalement d'hydrocarbures ; il contient également des composés organiques soufrés, oxygénés et azotés. On le rencontre dans les bassins sédimentaires, où il occupe les vides de roches poreuses appelées réservoirs. Les gisements de pétrole correspondent à une accumulation dans une zone où le réservoir présente des caractéristiques favorables et constitue un piège : la fuite du pétrole - moins dense que l'eau est rendue impossible vers le haut par la présence d'une couverture imperméable (argiles, sel) et latéralement par une géométrie favorable (dôme anticlinal, biseau de sables dans des argiles).

I.1.B. Définition de pétrole brut

Le pétrole brut est un liquide noir, quelques fois à reflets verdâtres et généralement plus léger que l'eau de densité varie entre (0,7 ÷ 0,9). Il est plus ou moins fluide suivant son origine, et son odeur habituellement forte et caractéristique.

Le pétrole est constitué par un mélange complexe de très nombreux composés hydrocarbures pour la plus part, et souvent un peu des traces des composés oxygénés et azotés et un peu de soufre à l'état de combinaison organiques. On le rencontre dans les bassins sédimentaires, où il occupe les vides de roches poreuses appelées réservoirs. Les gisements de pétrole correspondent à une accumulation dans une zone où le réservoir présente des caractéristiques favorables et constitue un piège : la fuite du pétrole - moins dense que l'eau - est rendue impossible vers le haut par la présence d'une couverture imperméable (argiles, sel) et latéralement par une géométrie favorable (dôme anticlinal, biseau de sables dans des argiles). [1]

I.1.C. Origine de pétrole brut

L'explication de l'origine du pétrole par l'évolution géologique de la matière organique a été formulée dès le XIX^e siècle; mais elle était alors fortement concurrencée par des théories impliquant des mécanismes inorganiques, par exemple l'action de l'eau sur des carbures métalliques. Quelques chercheurs en ex-U.R.S.S. font appel soit à des théories cosmiques dans lesquelles les hydrocarbures sont les restes d'une atmosphère primitive de la Terre, soit à des synthèses de type minéral, comme dans le procédé Fischer Tropsch, qui seraient réalisées à grande profondeur dans le sous-sol. En fait, l'hypothèse cosmique n'est guère soutenable, car il s'agit d'une étape cosmologique transitoire dont on n'est pas certain et qui est en tout cas ancienne ; d'autre part, quel que soit le mécanisme chimique envisagé dans le sous-sol, la quasi-totalité du carbone de l'écorce terrestre est représentée par la matière organique contenue dans les roches sédimentaires. De plus, des traces de l'origine organique des pétroles bruts peuvent être décelées ; en premier lieu, on y trouve des corps optiquement actifs, qui ne peuvent pratiquement être synthétisés que par les êtres vivants

on y trouve également : des porphyrines, ; des stéroïdes et triterpénoïdes, composés caractéristiques de la matière vivante. Il semble donc que l'essentiel des gisements de pétrole dérive, directement ou non, de la substance des êtres vivants incorporée dans les sédiments lors de leur dépôt. [1]

I.1.D. Composition du pétrole brut

Le pétrole brut, appelé aussi hydrocarbure, selon cette nomenclature, implique les deux mots hydrogène et carbone, qui sont les composants essentiels de tous les pétroles bruts; leurs teneurs sont (83%-87%) pour le carbone et (11%-14%) pour l'hydrogène. Ces deux éléments forment les trois grandes familles des hydrocarbures qui sont :

Hydrocarbures Aliphatiques

Hydrocarbures Cycliques

Les hydrocarbures mixtes.

Mais, on trouve aussi d'autres éléments qui le composent, qui sont plus au moins nocifs au traitement de brut ou lors de l'utilisation de ces fractions pétrolières finies. Ces éléments sont : l'oxygène, le soufre, et l'azote (au total jusqu'à 6% ÷ 7%) sous forme de composés. Aussi, on a pu détecter par l'analyse des cendres du pétrole la présence d'autres composés tels Cl, I, P, As, Si, Na, Fe... [2]

I.1.D.1. Les paraffines (hydrocarbures aliphatiques)

Ils sont constitués d'un enchaînement d'atomes de carbone combinés avec l'hydrogène et peuvent être structurés en chaînes droites ou ramifiées ; leur formule générale est : $C_n H_{2n+2}$

I.1.D.2. Les naphènes (hydrocarbures cycliques saturés)

Dans ces hydrocarbures, il y a cyclisation de tout partie du squelette carboné ; le nombre d'atomes de carbone du cycle ainsi formé peut varier. Ils ont des températures d'ébullition et des masses volumiques supérieurs à celles des alcanes à même nombre d'atomes de carbone. Dans les pétroles bruts, les cycles les plus fréquemment rencontrés sont ceux à cinq ou six atomes de carbone. Dans ces cycles, chaque atome d'hydrogène peut être substitué par une chaîne paraffinique droite ou ramifiée. Leur formule générale est : $C_n H_{2n}$

I.1.D.3. Les aromatiques

Ce sont des hydrocarbures cycliques poly insaturés présents en forte concentration dans les pétroles bruts. La présence dans leur formule d'au moins un cycle à trois doubles liaisons conjuguées leur confère des propriétés remarquables. En effet, les premiers termes (benzène, toluène, xylène) sont des matières premières fondamentales de la pétrochimie.

I.2. Distillation du pétrole

I.2.A. Introduction

La distillation est un procédé physique de la séparation des mélanges liquides, qui utilise la différence des points d'ébullition entre des produits qui se trouvent mélangés et même dissous les uns dans les autres dans la matière première. Elle est l'opération fondamentale du raffinage du pétrole brut, car elle est la première phase de fabrication appliquée à tous les pétroles s'ils sont bien décantés de l'eau salée qui les accompagne quelquefois. On distingue deux types de distillation :

La distillation atmosphérique

La distillation sous vide. [1]

I.2.B. Distillation atmosphérique

L'installation de la distillation atmosphérique se trouve la première dans le schéma de fabrication ; l'opération est réalisée dans une colonne verticale, appelée colonne de distillation, fonctionnant sous une pression de 1atm et possédant des soutirages latéraux.

La charge est chauffée dans un circuit de chauffage composé d'un four et une série d'échangeurs pour avoir une température à l'entrée de la colonne entre 330 – 380 C° (généralement 350 C°), une fois dans la tour, la charge se sépare en deux phases en équilibre:

- Une phase liquide qui se dirige vers la zone d'épuisement et au fond de la tour.
- Une phase vapeur ascendante, qui se dirige vers la zone de rectification et au sommet de la colonne.

I.2.C. Distillation sous-vide

La distillation sous vide est réservée au fonctionnement de produits contenant des hydrocarbures lourds dont les températures d'ébullition normales seraient au seuil du craquage. Elle est utilisée surtout pour les produits nobles pour lesquels il faut éviter toute trace d'altération par décomposition thermique. Elle permet en effet :

La fabrication des huiles de distillats lubrifiants qui, après traitement, serviront de base pour les huiles commerciales.

La redistillation de ces huiles après traitements au solvant.

La redistillation de certaines essences spéciales.

La préparation de charge des unités de craquage pour obtenir un gasoil sous vide à partir d'un résidu atmosphérique.

I.2.D. Description de la colonne de distillation atmosphérique

La colonne de distillation est un appareil cylindrique vertical avec de hauteur qui varie entre 40 et 50 m. Elle est munie des cloisons horizontales appelées plateaux qui ont pour rôle d'assurer un contact intime entre le liquide et le vapeur de façon à permettre l'équilibre des phases à la suite des transferts de chaleur et de matière, Elle se divise en trois zones :

I.2.D.1. Zone d'alimentation ou zone de flash

C'est la zone d'injection de la charge chauffée à une température de 350°C, où s'effectue la séparation en phase liquide et en phase vapeur. Elle doit assurer une bonne séparation des phases et protéger les parois contre l'érosion, pour ce là, la matière première entre par des tubulures tangentielles et se dirige vers le centre en spirale grâce à une plaque métallique placée verticalement. Il est compris entre le 5ème et le 6ème plateau.

I.2.D.2. Zone de rectification

Elle contient des plateaux pour permettre la rectification. le nombre de plateaux dépend de la nature de la charge à traiter et des fractions qu'on veut obtenir (entre 22 et 45).

I.2.D.3. Zone d'épuisement

Dans cette zone s'accumule la partie la plus lourde du pétrole. C'est le résidu atmosphérique qui servira de charge pour la distillation sous vide dans lequel on injecte la vapeur d'eau pour éliminer les constituants légers volatils. Cette zone comprend aussi des plateaux dont le nombre varie de (6-8).

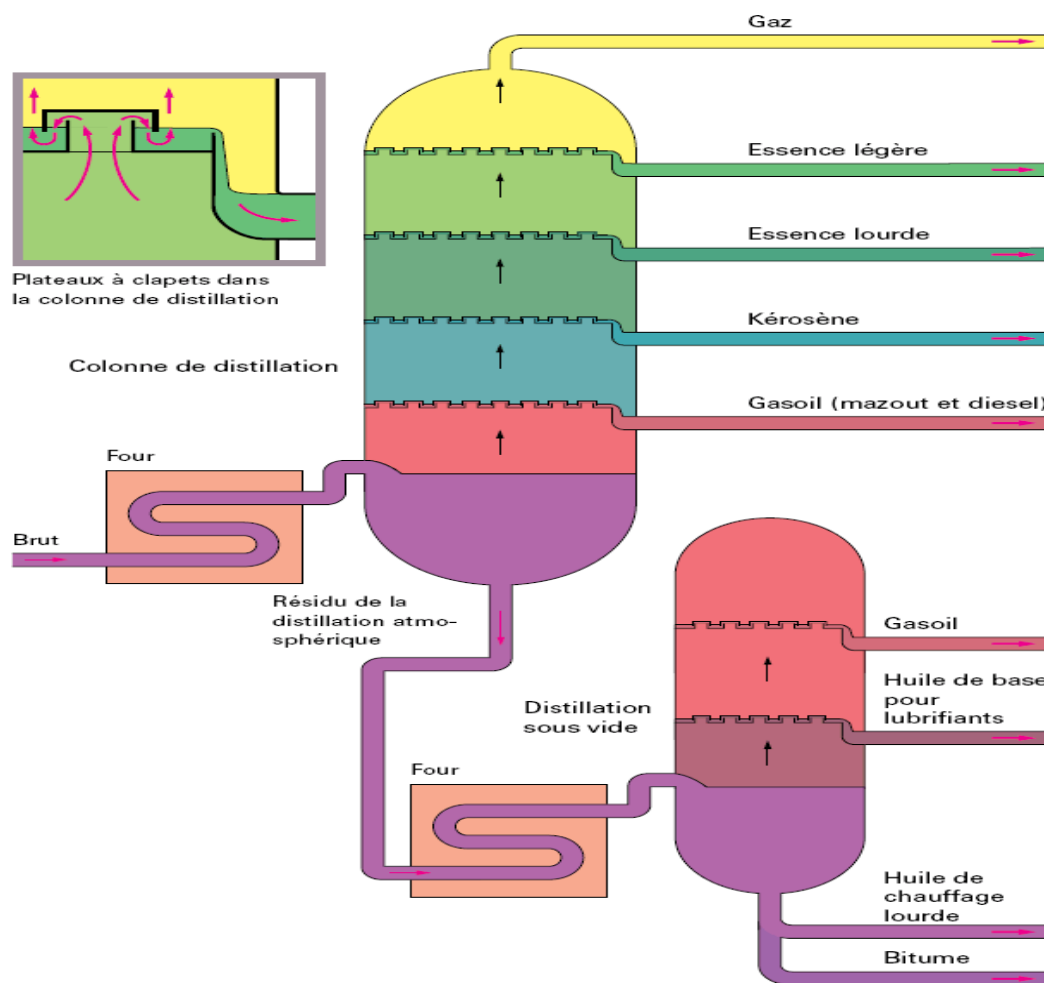


Figure I.1. Distillation atmosphérique et sous vide

I.2.E. Les dérivés du pétrole

Tableaux I.1. Les produits dérivés du pétrole [3]

Hydrocarbures	Utilisations
Gaz liquéfiés	-Gaz domestique et gaz industriel -Gaz carburant pour moteurs -Gaz d'éclairage -Résines et fibres pour plastiques et textiles

Matières premières pour l'industrie chimique	-Produits du caoutchouc -Nylon -Plastique
Noir de carbone	-Encres d'imprimerie Industrie du caoutchouc
Distillats légers	
Naphtas légers	-Oléfines -Solvants et diluants -Solvants d'extraction -Matières premières pour l'industrie chimique
Naphtas intermé- diaires	-Essence aviation et essence pour automobiles -Solvants de nettoyage à sec
Naphtas lourds	-Carburéacteurs militaires -Carburéacteurs et kérosène -Carburants pour tracteurs
Gazole	-Charge de craquage catalytique -Huile de chauffage et carburant diesel -Combustible pour la métallurgie -Huile d'absorption pour l'extraction du benzène et de l'essence
Distillats lourds	
Huiles techniques	-Huiles pour textiles -Huiles médicinales et cosmétiques -Huile blanche pour l'industrie de l'alimentation
Huiles de lubrifica- tion	-Huile pour transformateur et huile à broche -Huiles pour moteurs -Huiles pour machines et compresseurs -Huiles pour turbines et huiles hydrauliques -Huiles pour transmission -Huiles d'isolation pour machines et câbles -Huiles pour essieux, engrenages et moteurs à vapeur -Huiles pour traitement des métaux, huiles de coupe et de meulage -Huiles de refroidissement et huiles antirouille -Huiles pour échangeurs de chaleur -Graisses et produits lubrifiants -Huiles pour encres d'imprimerie
Paraffines	-Industrie du caoutchouc -Produits pharmaceutiques et cosmétiques -Industries de l'alimentation et du papier -Bougies et allumettes
Résidus	

Pétrolatum	-Vaseline -Produits cosmétiques -Antirouilles et lubrifiants -Produits d'enrobage de câbles
Fioul résiduel	-Huile pour chaudière et fioul pour procédés
Bitumes	-Bitumes routiers -Matériaux pour toitures -Lubrifiants asphaltiques -Isolation et protection de fondations -Produits en papier imperméable à l'eau
Sous-produits du raffinage	
Coke	-Electrodes et combustible
Sulfonâtes	-Emulsifiants
Acide sulfurique	-Engrais synthétiques
Soufre	-Produits chimiques
Hydrogène	-Reformage des hydrocarbures

Chapitre II

Les huiles lubrifiantes

Les huiles lubrifiantes

II.1. Introduction

Il y a encore cent ans, les lubrifiants étaient presque tous d'origine animale ou végétale, et il avait fallu des siècles de raffinement pour élaborer quelques composés. Mais, à cause des développements dus à l'ère industrielle, la technologie des lubrifiants a évolué rapidement pour devenir une spécialisation très poussée [4].

Historiquement de la lubrification remonte à l'Antiquité lorsqu'il s'agissait de mieux maîtriser les frottements, mais on pourrait dire que c'est lors de la révolution industrielle que son développement a été scellé. Toutefois, la science des frottements, ou tribologie, n'a acquis ses lettres de noblesse que récemment, au milieu des années 60 [5].

II.2. Définition de la lubrification

La lubrification facilite le glissement des parties frottantes d'un ensemble en interposant un film onctueux entre ces parties. La science qui s'occupe de ces phénomènes (frottements, glissement, lubrification, usure) s'appelle la tribologie. Le champ d'application est très vaste ; on trouve des exemples de lubrification dans des domaines aussi différents que le forage pétrolier, l'usinage de pièces métalliques, la mécanique automobile, les usages domestiques (charnières, serrures...) mais encore dans des domaines biologiques (larmes, ...). De cette diversité d'applications résulte une grande variété de lubrifiants qui ont été conçus pour s'adapter au mieux à chaque situation [6].

II.3. Les huiles lubrifiantes

Les huiles lubrifiantes sont composées d'un composant principal appelé « base », ce composant peut être minéral ou synthétique [7], et toutes sortes d'additifs qui leur confèrent de meilleures propriétés et leur permettent de fonctionner sur de larges plages de températures [8].

II.4. Composition d'une huile lubrifiante

Une huile ayant les propriétés demandées pour une utilisation donnée est constituée : d'une **huile de base** (*minérale, synthétique ...*) et d'un certain nombre d'**additifs**, ajoutant chacun une propriété particulière [9].



Figure II.1. Composition d'une huile lubrifiante

II.4.A. Les huiles de Bases

II.4.A.1 Les huiles minérales

Les huiles minérales proviennent de la distillation du pétrole brut. D'un prix peu élevé, elles présentent des performances « moyennes ».

Le procédé d'obtention de ces huiles n'est pas parfait : les molécules obtenues sont de tailles différentes, ce qui nuit à l'homogénéité de l'huile et limite ses possibilités d'application. Des produits indésirables restent également dans cette huile de base (*paraffines, solvants légers...*).

Les huiles minérales sont, et de très loin, les plus utilisées aussi bien dans les applications automobiles qu'industrielles [9].

II.4.A.2 les huiles de semi synthèse

Les huiles de semi synthèse s'obtiennent à partir d'un mélange d'huiles minérales et d'huiles de synthèse généralement 70 à 80% d'huile minérale et 20 à 30% d'huile de synthèse) [9].

II.4.A.3 Les huiles de synthèse ou synthétiques

Dans le cas de l'huile synthétique, on fabrique la molécule dont on a précisément besoin, si bien que l'on obtient une huile de base dont le comportement est voisin de celui d'un corps pur. En créant un produit dont les propriétés physiques et chimiques sont prédéterminées, on fait mieux que la nature.

On rajoute ensuite les additifs nécessaires pour répondre à un service voulu. Ces huiles ont des performances élevées, en particulier pour des objectifs et des conditions de service difficiles [9].

Ces huiles offrent des performances supérieures :

1. Indice de viscosité plus élevé
2. Meilleure tenue thermique
3. Meilleure résistance à l'oxydation

Tableau II.1. des exemples de familles d'huiles de synthèse

Exemples de familles d'huiles de synthèse	
Polyglycols	- Bonnes propriétés lubrifiantes, haut indice de viscosité : 150 à 200 m²/s, faible volatilité (vaporisation), bonne stabilité thermique, incompatible avec les huiles minérales. Exemples d'utilisations : - Polyglycol soluble à l'eau : fluide difficilement inflammable, fluide d'usinage ... - Polyglycol insoluble : fluide de frein, lubrifiant moteur, lubrifiant engrenage ...
Esters	- Faible volatilité, bonnes propriétés à froid, bonne tenue thermique, bonne propriété solvante et bonne résistance au cisaillement. Exemples d'utilisation : graisse, turbine à gaz, aviation, utilisé comme additif (pouvoir lubrifiant élevé).
Hydrocarbures synthétiques	- Comportement à froid performant, indice de viscosité élevé. Selon la longueur de la chaîne, bonne propriété thermique. Exemples d'utilisations : (polyalphaoléfines) : lubrifiant d'engrenages, compresseur...
Silicone	- Inerte chimiquement, grande résistance à la chaleur et à l'oxydation, hydrophobe (qui n'absorbe pas de l'eau), indice de viscosité élevée, bonne propriété à froid, incompatibilité chimique avec de nombreux additifs. Exemples d'utilisations : graisse, fluide hydraulique ...

II.4.B. Les additifs

Sont très nombreux ; ils présentent environ 25% de la masse totale de l'huile utilisée, chacun ayant une fonction bien définie. Les additifs peuvent stimuler les propriétés existantes des huiles lubrifiantes [10], a fin de prolonger durée de vie soit du moteur soit de l'huile et pour interdire la dégradation rapide des huiles usagées [11]. Les additifs généralement utilisés sont :

II.4.B.1. Les additifs extrême-pression

Souvent appelés additifs (EP) évitent les soudures locales dans les cas où la charge élevée conduit à des contacts métal-métal, permettre a l'huile de réduire les couples de frottement et par conséquence économiser l'énergie, et protéger les surfaces des fortes charges, Le mécanisme de fonctionnement des additifs EP est le plus souvent une réaction chimique entre l'additif et la surface du métal

II.4.B.2. Les additifs antioxydants

Supprimer, ou tout au moins ralentir les phénomènes d'oxydation du lubrifiant. Contribuer à l'espacement des vidanges par une meilleure tenue aux hautes températures [7].

II.4.B.3. Les additifs anti-mousse

Dans la plupart des applications, les lubrifiants sont agités, ce qui provoque la formation de bulles d'air et de mousse, un moussage excessif de l'huile entraîne des défauts

de lubrification et une oxydation précoce [12]. Le rôle des additifs anti- mousses, est la réduction la tension de surface et les bulles de lubrifiant éclatent lorsqu'elles atteignent la surface du bain d'huile [13].

II.4.B.4. Les Détergents

Ils libèrent très largement les surfaces chaudes des dépôts (par exemple sur les pistons).

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

II.4.B.5. Les inhibiteurs anticorrosion

Empêcher l'attaque des métaux ferreux, attaque due à l'action conjuguée de l'eau, de l'oxygène de l'air et de certains oxydes formés lors de la combustion, La corrosion est due plus spécifiquement à l'action de l'acidité de composés soufrés et d'acides.

II.4.B.6. Les dispersants

Contrairement aux précédents, ils agissent essentiellement à basse température en retardant la formation de dépôts ou de boues, Son rôle est de maintenir en suspension toutes les impuretés solides formées au cours de fonctionnement du moteur : imbrûlés, gommages, boues, suies diesel, dépôts nettoyés par les détergents.

II.4.B.7. Les additifs à effet polaire

Les graisses animales et végétales, les acides gras et les esters ont un effet polaire, ce qui signifie que les molécules s'orientent perpendiculairement à la surface métallique sur laquelle elles adhèrent. De petites additions de ces matières améliorent l'onctuosité du lubrifiant et renforcent sa capacité de charge en diminuant les frottements jusqu'à environ 100°C. De plus, cette couche moléculaire ou épilamen a un effet antirouille [15].

II.4.B.8. Les additives anti-usures

Les additives anti-usures ou Anti-Wear (AW) forment une couche en surface qui protège contre l'usure et permettent d'éviter le contact direct (métal sur métal) entre les surfaces en contact. Ce sont en général des composés soufrés, chlorés, phosphorés qui forment des dépôts superficiels autolubrifiants facilement cisailables (sulfures, chlorures, phosphates métalliques...) protégeant ainsi les surfaces et évitant l'usure adhésive [15].

II.5. Classification des lubrifiants

On peut distinguer les lubrifiants selon leur origine, animale, végétale, minérale ou synthétique, ou selon leur présentation, liquide, pâte ou solide.

II.5.A. Lubrifiants d'origine animale

Ils sont constitués essentiellement d'esters résultant de la combinaison d'acides gras avec la glycérine. Ce sont souvent des « *ancêtres* » mais certains entrent encore dans diverses compositions :

- *Liquides* : oléines, huiles de lard, de pied de bœuf ou de mouton, etc., très onctueuses, huiles de poisson, de baleine, de phoque, glycérine autrefois utilisée pour son point de congélation très bas.
- *Pâteux* : oléo stéarines, suifs (*qui deviennent très acides par oxydation*), suintines et brais résultant du traitement de la laine, lanoline très utilisée dans les produits antirouille car elle absorbe l'eau
- *Solides* : stéarine, dont l'usage est restreint à la formulation de graisses très dures [6]

II.5.B. Lubrifiants d'origine minérale

- *Liquides* : huiles de houille (Charbon utilisé comme combustible), de schiste (Roche sédimentaire ou métamorphique qui se débite en feuillets), utilisables comme produits de remplacement, et surtout huiles de pétrole.
- *Pâteux* : vaseline.
- *Solides* : soufre utilisé autrefois pour sauver les paliers endommagés, talc, mica, bisulfures de molybdène et de tungstène, graphite, sulfure de plomb, oxyde de zinc.

II.5.C. Lubrifiants d'origine végétale

Ce sont en général des combinaisons d'acides gras peu ou pas estérifiés. Certains sont encore largement utilisés en addition dans les huiles de pétrole ou dans les graisses :

- *Liquides* : huiles semi siccatives (*s'épaississant par oxydation*) de coton, de colza, huiles non siccatives d'arachide, d'olive, et surtout de ricin intéressante par sa forte viscosité et la possibilité de l'utiliser dans une large gamme de températures.
- *Pâteux* : huiles de palme, de coco et de coprah, liquides aux températures tropicales mais pâteuses dans les régions froides
- *Solides* : résines et colophanes tirées du pin, pouvant résister à l'eau [9].

II.5.D. Lubrifiants d'origine synthétique

- *Liquides* : silicones, polyglycols, esters phosphoriques, esters aliphatiques, polyoléfines, métaux liquides.
- *Pâteux* : verres, borates et oxyde de bore B₂O₃ (*pâteux à chaud*), graisses

silicones.

- *Solides* : polyéthylènes, polytétrafluoroéthylène (PTFE), savons (*stéarates de zinc, de calcium, d'aluminium, etc.*), oxyde de plomb (PbO), disulfure de tungstène, phtalocyanine, fluorure de graphite, fluorures de calcium, de baryum et de lithium, nitrure de bore.

II.6. Propriétés des huiles

II.6.A. Propriétés physiques

II.6.A.1. Densité

Elle se mesure à 15 °C par rapport à l'eau à 4 °C, à l'aide d'un densimètre plongeant dans un tube à essais. Les valeurs courantes pour les huiles de pétrole varient de 0,85 à 0,95 et dépendent de l'origine des produits. La densité diminue avec la température selon des lois complexes, mais en première approximation on peut la diminuer de 0,00062 par kelvin. Certains lubrifiants synthétiques ont des densités bien plus élevées, jusqu'à 1,5. La comparaison de la densité d'une huile usagée avec celle de l'huile neuve permet de détecter d'éventuelles pollutions.

II.6.A.2. Couleur

Pour les huiles de pétrole, elle varie généralement du blanc pur au rouge foncé en passant par le jaune citron et le jaune orange, on l'évalue par comparaison avec des verres étalons numérotés en colorations NPA (*National Petroleum Association*). La couleur foncée d'un lubrifiant usagé peut être un assez bon moyen d'apprécier son altération, de même qu'un aspect laiteux peut indiquer la présence d'eau. La présence d'additifs oblige à la prudence et cette propriété a beaucoup perdu de son intérêt aujourd'hui [9].

II.6.A.3. Chaleur massique

Elle s'exprime en Joules par kilogramme x kelvin (J/kg.K). Elle augmente avec la température, d'environ 20 % pour 100 °C, et diminue avec la densité. Aux environs de 100 °C, on peut prendre comme base 2 kJ/kg.K [9].

II.6.A.4. Conductivité thermique

Elle définit le flux thermique passant à travers un corps sous l'effet d'un gradient thermique (*en watts par mètre par kelvin*). On peut prendre comme valeur moyenne pour les huiles minérales 0,14 W/m.K

II.6.A.5. Viscosité

C'est une des propriétés capitales des huiles de graissage, qui conditionne leur emploi dans la majorité des cas. Plus grande est la viscosité d'un liquide, plus grande est la durée de

son écoulement, par exemple. La notion de viscosité implique donc celle de mouvement. En fait, on peut dire que la viscosité est **la résistance qu'oppose un fluide au glissement de ses molécules les unes sur les autres**, autrement dit, sa résistance à la déformation.

Considérons deux surfaces planes parallèles d'aire S , l'une fixe, l'autre se déplaçant à la vitesse V , sous l'effet d'une force F , à la distance constante h de la première. Les deux plaques sont séparées par une lame liquide qui oppose une résistance au déplacement de ses molécules. La relation entre F et S n'est pas autre chose qu'une **contrainte de cisaillement** :

$$\tau = F/S.$$

→ Viscosité dynamique :

La notion de viscosité fait également appel à celle d'écoulement laminaire. Tout se passe comme si le fluide s'écoulait comme le feraient les cartes d'un jeu ou les feuilles d'une ramette de papier. Dans ces conditions, on s'aperçoit que la répartition des vitesses dans la veine fluide suit une loi linéaire. Si deux couches de fluide distantes de la quantité dh ont pour vitesses respectivement v et $(v + dv)$, il existe entre elles un gradient de vitesse dv/dh . Pour les liquides dits newtoniens, la contrainte de cisaillement est proportionnelle au gradient de vitesse, ce qui est le cas de la grande majorité des huiles de graissage, sauf au voisinage de leur point d'écoulement.

$$F/S = \mu dv/dh$$

μ est, à une température et une pression donnée, une constante que l'on appelle coefficient ou module de viscosité dynamique, ou plus simplement **viscosité dynamique**. Cette grandeur a pour dimension $M.L^{-1}.T^{-1}$.

L'unité de mesure correspondante est le **Pascal x seconde [Pa.s]**, défini comme la viscosité dynamique d'un fluide dans lequel le mouvement rectiligne et uniforme, dans son plan, d'une surface plane, solide, indéfinie, donne lieu à une force retardatrice de **1 newton par mètre carré** de la surface en contact avec le fluide homogène et isotherme en écoulement permanent. (Le gradient de la vitesse du fluide, à la surface du solide et par mètre d'écartement normal à ladite surface, est de 1 mètre par seconde).

Le pascal x seconde s'appelait auparavant poiseuille **[Pl]**, du nom du médecin Jean-Louis- Marie Poiseuille.

La viscosité dynamique ne tient pas compte de la masse volumique des fluides. Ainsi, de deux fluides de même viscosité dynamique s'écoulant dans les mêmes conditions sous l'effet de leur poids, le plus dense s'écoulera plus rapidement.

→ Viscosité cinématique :

L'unité de mesure de la **viscosité cinématique**, le mètre carré par seconde **[m²/s]**, est définie comme étant celle d'un fluide dont la viscosité dynamique est 1 pascal x seconde et la masse volumique 1 kilogramme par mètre cube. Il s'ensuit que la viscosité cinématique est

égale au rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique, toutes deux définies à la même température :

$$\nu = \mu / \rho$$

μ : viscosité dynamique [Pa.s].

ν : viscosité cinématique [m²/s].

ρ : masse volumique [Kg/m³].

L'unité de mesure **CGS** était le stokes [St] ou [cm²/s]. On utilisait plus fréquemment le centistokes [cSt] qui n'est autre que le [mm²/s]. (1 cSt = 10⁻⁶ m²/s = 1 mm²/s)[6].

II.6.A.6. Indice de viscosité

L'« indice de viscosité » donne une idée de la variation de la viscosité de l'huile avec la température. La notion d'indice de viscosité ($VI = \text{viscosity index}$) a été conçue en 1929 par *Dean et Davis*. Ceux-ci retiennent deux séries extrêmes d'huiles de référence, les unes donnant les plus grandes variations de la viscosité avec la température (*indice 0*), les autres les plus faibles (*indice 100*). L'indice de viscosité d'une huile donnée est obtenu par comparaison avec ces deux séries d'huiles de référence, notées *L* et *H* pour les indices 0 et 100 respectivement.

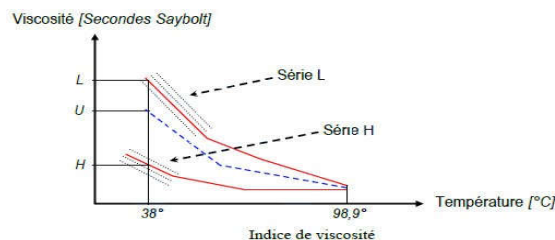


Figure II.2. Indice de viscosité

Soit une huile quelconque dont la viscosité varie comme l'indique la courbe tracée en pointillé sur la *figure II.3*, l'indice de viscosité se calcule par la formule suivante :

$$VI = 100 \times \frac{L - U}{L - H}$$

Ce procédé permet de situer une huile quelconque par rapport aux deux séries d'huile de référence. Plus l'indice **VI** est grand, plus la courbe est voisine de la série **H** (*caractère paraffinique accentué*), par conséquent moins grande est la variation de la viscosité avec la température [6].

II.6.A.7. Compressibilité

Le module de compressibilité est de l'ordre de 6.105 en régime isotherme, par conséquent la diminution de volume est d'environ 2 % à 350 bar et 4 % à 700 bars. Les huiles sont d'autant moins compressibles que la pression est plus forte, la viscosité plus faible et la température plus basse [9].

II.6.A.8. Coefficient de viscosité-pressure

Si la pression croît, la mobilité des molécules diminue et la viscosité augmente selon une loi exponentielle. Pour une huile minérale classique, la viscosité à 350 bars est environ deux fois plus forte qu'à la pression atmosphérique, ce qui équivaut à une baisse de température de 10 à 15 °C.

Le tableau ci-dessous donne une idée des variations relatives de viscosité de l'eau et d'une huile courante à 20 °C :

Tableau II.2. viscosité de l'eau et de l'huile

Pression [bar]	Viscosité de l'eau	Viscosité de l'huile
1	1	1
1 000	1,08	4,3
2 000	1,16	15
4 000	1,36	110

Dans le cas de contacts localisés en mouvement sous très fortes charges, comme dans les engrenages, il faut tenir compte d'une part de l'accroissement de la viscosité sous l'effet de la pression, d'autre part de la déformation élastique des pièces dans la zone chargée. Ce calcul, possible grâce à la théorie de la lubrification élastohydrodynamique de *Grubin*, sort du cadre de ce cours [9].

II.6.A.9. Point d'écoulement

Suffisamment refroidies, toutes les huiles minérales s'épaississent jusqu'à prendre l'apparence de solides plus ou moins rigides. Il ne s'agit pas d'une congélation, laquelle n'a de sens que pour un corps pur passant de l'état liquide à l'état solide à température constante : on le sait, les huiles de graissage sont des mélanges.

En fait, les hydrocarbures paraffiniques les plus lourds flocculent les premiers en donnant à l'huile un aspect trouble. La multiplication des cristaux se poursuivant, ces derniers finissent par s'agglomérer en un réseau enfermant les fractions encore liquides.

Une norme précise la procédure complexe qui permet de déterminer la température à laquelle une huile cesse de couler et de se laisser pomper dans un circuit de graissage. Il est difficile d'obtenir une grande précision et la norme admet un écart de reproductibilité de 6 °C. En pratique, la notion de point d'écoulement est très insuffisante pour évaluer les performances d'une huile à froid, il vaut mieux définir et mesurer la viscosité au-delà de laquelle le pompage est impossible. Le viscosimètre Brookfield mesure à cet effet le couple résistant d'une palette tournant dans l'huile.

II.6.B. Propriétés chimiques

II.6.B.1. Point d'éclair

À partir d'une certaine température, les constituants volatils de l'huile peuvent brûler au contact d'une flamme : *c'est le point éclair*.

Si on chauffe davantage, il arrive un moment où la combustion devient permanente : *c'est le point de feu*.

Ces deux températures sont très variables avec les paramètres locaux et en particulier avec la présence d'eau en suspension dans l'huile. Leur mesure fait l'objet de normes. À partir du point d'éclair Cleveland, il est possible de déduire le point de feu Cleveland avec une assez bonne précision. Quand une huile est portée à son point d'éclair, sa tension de vapeur est de l'ordre de 13 mbar.

Le point éclair c'est une température à laquelle il faut chauffer un liquide combustible pour qu'il émane suffisamment de gaz pour former, avec l'air, un mélange momentanément inflammable pour qu'il prenne feu quand on en approche une petite flamme dans des conditions données (*méthode D 92 de l'ASTM*).

II.6.B.2. Température d'auto-inflammation

C'est la température à partir de laquelle se produit une oxydation spontanée dans l'air (*Environ 400 °C*). Cette température est nettement supérieure à celle du point d'éclair

II.6.B.3. Détergence, dispersivité

Cela concerne surtout les huiles pour moteurs. Il faut éliminer les résidus de combustion qui se condensent à basse température et les produits de la dégradation de l'huile à haute température. La détergence et la dispersivité constituent en fait un ensemble de propriétés physicochimiques particulièrement difficiles à évaluer.

II.6.B.4. Teneur en cendres

On compare le résidu de la calcination de l'huile à la masse initiale. Pour une bonne huile minérale pure, on trouve en général une teneur en cendres variant de 0,001 à 0,05 %. Cette teneur peut être beaucoup plus élevée, et sa mesure devient alors compliquée, si l'huile contient des additifs organométalliques ou autres.

Une teneur en cendres élevée pose des problèmes dans les moteurs thermiques modernes car les résidus de combustion de l'huile tendent à se déposer dans les filtres à particules.

II.6.B.5. Teneur en soufre

Il n'y a normalement plus de soufre libre dans les lubrifiants après le raffinage, mais on en trouve souvent à l'état combiné dans des composés tels les mercaptans. On ajoute parfois du

« Soufre actif » sous forme d'additifs améliorant les propriétés anti-soudure ou anti-grippage. Si l'huile se décompose, et selon que l'on se trouve en milieu réducteur ou oxydant, on peut assister à un dégagement toujours malvenu de sulfure d'hydrogène ou de dioxyde de soufre.

II.6.B.6. Teneur en eau

L'eau est l'un des principaux ennemis des lubrifiants. Dans les environnements humides, lorsqu'un lubrifiant reçoit de l'eau directement ou par condensation de vapeur, ses performances sont en général fortement diminuées. La sensibilité à l'eau est très variable selon le produit utilisé, relativement faible pour les glycols, beaucoup plus élevée pour les oléfines. Une teneur en eau trop élevée est un sérieux signal d'alerte avant une prochaine défaillance du mécanisme concerné [9].

II.7. Fonctions des lubrifiants

Les fonctions principales d'un lubrifiant sont :

II.7.A. Refroidir (l'évacuation des calories)

La circulation de l'huile évacue les calories, et élimine les risques de fusion et de détérioration. Un moteur, surtout aujourd'hui avec les technologies de pointes ou les difficultés de circulation, peut chauffer anormalement jusqu'à 400° [9].

II.7.B. Etancher

Contribuer à parfaire l'étanchéité du moteur : *(L'huile protège constamment les pièces d'agressions comme les poussières aspirées par le moteur, l'eau et l'acide résultant de la combustion...)* [9].

II.7.C. Nettoyer

L'huile maintient en suspension et véhicule les imbrûlés issus de la combustion. *(C'est à ce niveau qu'elle a de l'importance car il n'a plus d'étanchéité. Le moteur consomme anormalement ...Il arrive même qu'il ait des grippages. C'est le phénomène d'usure par polissage)* [9].

II.7.D. Lubrifier

Diminuer les frottements et les résistances passives dans les machines, améliorer leur rendement et économiser l'énergie. *(La viscosité d'une huile moteur devrait rester constante malgré des écarts de température. L'huile ne doit pas figer au froid, elle ne doit pas se liquéfier à la chaleur).*

Elles permettent aussi de :

- Protéger les organes lubrifiés contre les diverses formes de *corrosion* et d'usure, donc contribuer à leur longévité
- Transmettre de *l'énergie* ou de la chaleur ;
- Assurer *l'isolation* électrique ;
- Améliorer *l'état de surface* des pièces usinées ;
- Augmenter la *durée de vie*.
- ...

II.8. Contamination des lubrifiants

On ne dira jamais assez que la propreté des lubrifiants est un facteur essentiel du bon fonctionnement et de la fiabilité des machines. Les matériaux presque invisibles qui se trouvent dans les huiles ou dans les graisses n'interviennent pas seulement par le nombre et la taille des particules, beaucoup d'autres facteurs interviennent [16] ces facteurs sont :

II.8.A. Taille

On la définit généralement par le diamètre d'une sphère de même volume que la particule considérée, de façon à établir une comparaison avec le jeu régnant entre les surfaces fonctionnelles des mécanismes. Plus les particules sont petites, plus elles pénètrent facilement entre les surfaces et plus elles y causent des dommages de diverses sortes, principalement par usure abrasive. Ce phénomène est aggravé lorsqu'une grosse particule se trouve écrasée pour former des particules plus petites. Par exemple, une particule de 40 μm peut théoriquement être fragmentée en plus de 500 particules de 5 μm [16].

II.8.B. Surface extérieure

Lorsqu'une grosse particule se fragmente en plus petites, la surface extérieure en contact avec le lubrifiant s'accroît considérablement (elle est par exemple multipliée par 8 dans le cas de l'exemple précédent). Plus les particules se fragmentent, plus elles restent longtemps en suspension dans les huiles, plus elles retiennent l'eau en engendrant des émulsions, plus elles engendrent la formation de bulles d'air, plus elles consomment les additifs anti-usure, extrême pression, antirouille et autres ; Il en résulte une dégradation rapide des propriétés des lubrifiants, éventuellement aggravée par des réactions catalytiques indésirables [16].

II.8.C. Formes

Les particules plus ou moins sphériques agissent parfois à la manière des billes des roulements et peuvent créer des empreintes en déformant les surfaces si elles sont l'objet de pressions excessives. Lorsque les particules présentent un aspect anguleux, elles peuvent créer une usure rapide par abrasion à trois corps. La fragmentation des grosses particules en plus petites crée essentiellement des fragments anguleux et donc doublement dangereux à la fois

par leur caractère agressif et par la facilité avec laquelle ils pénètrent entre les surfaces. Si une particule sphéroïdale est brisée en 100 morceaux cubiques, il en résulte 800 pointes abrasives [16].

II.8.D. Dureté

Les particules sont souvent très dures à cause de l'écrouissage dont elles ont été l'objet et aussi en raison de leur nature (silice, alumine, débris d'outils de coupe, etc.). Si dans une certaine mesure la dureté rend les particules plus résistantes à l'écrasement, en revanche elle les rend aussi bien plus agressives [16].

II.8.E. Densité

Elle influe directement sur la flottabilité des particules dans les huiles. Les plus lourdes décantent plus facilement que les plus légères et sont a priori plus faciles à séparer. En revanche, elles créent plus facilement des phénomènes d'érosion dans les systèmes de circulation d'huile lorsque ceux-ci leur confèrent des vitesses importantes [16].

II.8.F. Composition chimique

La poussière minérale qui se forme à partir de la terre ou des roches est connue pour sa dureté et son pouvoir abrasif mais elle est chimiquement inerte par rapport aux huiles. En revanche les particules métalliques naissantes favorisent l'oxydation des lubrifiants et la formation d'acides, de vernis et de cambouis [16].

II.8.G. Polarité

Beaucoup de particules manifestent des tendances polaires ou possèdent des charges électriques dues à l'ionisation. De ce fait, elles ont tendance à réagir avec certains produits présents dans les lubrifiants, comme les additives anti-usures, détergents, dispersants, etc. Elles ont aussi davantage tendance à s'agglomérer au point d'empêcher parfois le passage de l'huile et à former de nouveaux contaminants solides. Les réactions ainsi mises en jeu sont généralement favorisées par la présence d'eau [16].

II.8.H. Propriétés magnétiques

Des aimants permanents permettent de retenir une partie des particules magnétiques de fer ou d'acier et sont de ce fait souvent utilisés dans les systèmes de filtration des huiles. Cependant, certaines particules peuvent avoir été attirées par ces aimants sans que ceux-ci aient réussi à les fixer. Comme elles sont alors souvent devenues magnétiques elles-mêmes, on peut les retrouver fixées en grandes quantités sur certaines pièces des circuits de lubrification. Les particules peuvent aussi être magnétisées par l'action des électroaimants que l'on trouve souvent dans les servo-valves et autres composants actifs des circuits [16].

II.8.I. Conductivité électrique

C'est plutôt ici une qualité. Les lubrifiants faits à partir de bases très pures sont souvent de bons isolants électriques dans lesquels peuvent se former des charges électrostatiques importantes par suite de la friction moléculaire. Les particules conductrices présentes dans les huiles peuvent contribuer efficacement à la dispersion de ces charges en évitant les décharges brutales et donc les étincelles qui endommagent à la fois les surfaces et les lubrifiants [16].

II.8.J. Nombre

Il est clair que le potentiel de destruction des particules est d'autant plus grand que leur nombre est plus élevé, et il faut en outre se rappeler que les grosses particules se brisent en provoquant l'apparition d'une multitude de petites. Limiter la « population » de particules est un bon moyen d'améliorer la fiabilité des machines et installations [16].

II.8.K. Le coût des dégâts

L'action discrète mais permanente et efficace des particules coûte généralement beaucoup plus cher qu'une politique intelligente de surveillance attentive de la lubrification ... Les pertes économiques sont essentiellement de quatre ordres :

- consommation des surfaces par usure ;
- diminution des débits de lubrifiants et augmentation des frottements ;
- accroissement de la consommation de filtres et de lubrifiants ;
- augmentation des consommations d'énergie et de matières premières et des pollutions [16].

Chapitre III

Les machines tournantes

Les machines tournantes

III.1. Turbine hydraulique

III.1.A. Définition

Une turbine hydraulique est une machine tournante qui produit une énergie mécanique à partir d'eau en mouvement (cours d'eau ou marée) ou potentiellement en mouvement (barrage). Elle constitue le composant essentiel des *centrales hydroélectriques* destinées à produire de l'électricité à partir d'un flux d'eau.

A=générateur;

1=stator ;

2=rotor;

B=turbine;

3=vannes réglables;

4=pales de la turbine;

5=flux d'eau;

6=axe de rotation de la turbine et du générateur

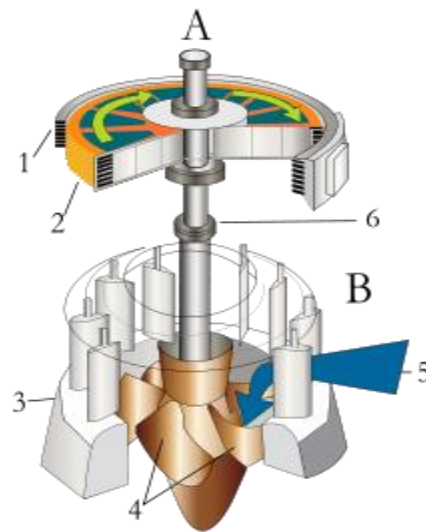


Figure III.1. Turbine hydraulique et générateur électrique

Depuis la roue à aubes entrainant un moulin, les machines hydrauliques ont subi une évolution technique considérable.

Il existe actuellement plusieurs types de turbines, et pour chaque type, une large plage de caractéristique.

Il est donc important pour l'ingénieur s'occupant de l'acquisition d'une turbine, de posséder un certain nombre de connaissance au sujet de ces machines, de leur implantation et de leur fonctionnement [17].

III.1.B Naissance des turbines hydrauliques

Dès la fin du XVII^e apparaît une nouvelle forme d'énergie mécanique avec les machines à vapeur et, dans la première moitié du XVIII^e, cette technologie vient concurrencer l'énergie hydraulique, surtout en Angleterre où la machine à vapeur s'impose dans les manufactures à partir de 1830. Cette concurrence de la machine à vapeur et le besoin sans cesse croissant de l'industrie en énergie vont stimuler l'innovation. Le milieu du XVIII^e marque le début d'un long processus d'amélioration et conception des machines hydrauliques. On ne parle pas encore de turbines, l'amélioration porte sur les roues à aubes afin d'augmenter leur puissance et leur rendement. En même temps des ingénieurs explorent des

voies nouvelles, c'est finalement un jeune ingénieur français, Benoît Fourneyron qui est sur les pas de ses prédécesseurs (en particulier son professeur à l'école des Mineurs de Saint-Etienne Claude Burdin, 1788/1873) , Le développement de cette turbine en phase industrielle ne sera pas immédiat, mais à partir de 1832 son essor va être rapide et universel, parallèlement la puissance développée augmente. En Europe, vers 1843, 129 usines sont équipées de turbines Fourneyron. Aux États-Unis, en 1895, la première Fran de central hydroélectrique, aux chutes de Niagara, reçoit trois turbines Fourneyron de 3700KW.

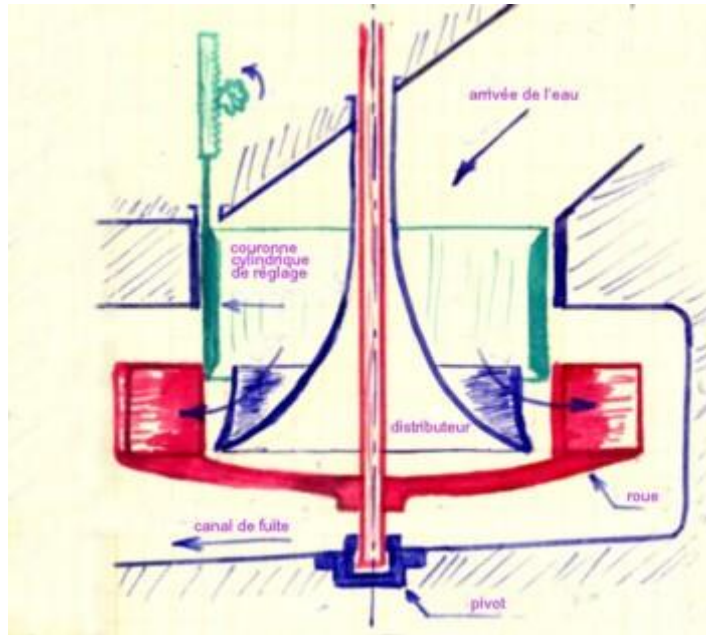


Figure III.2 La turbine radiale et centrifuge Fourneyron

La turbine Fourneyron est une machine centrifuge dite à réaction, nous en reparlerons dans le chapitre des turbines. Mais cette machine n'est pas sans défauts. Toujours aux USA, une première turbine de Fourneyron était installée dans une manufacture de textiles du Massachusetts pour fournir l'énergie mécanique. Un jeune ingénieur d'origine anglaise, employé de cette manufacture, James B. FRANCIS entreprit des recherches sur la machine de Fourneyron qui aboutirent, en 1855,. Si le nom de FOURNEYRON est maintenant oublié, ce n'est pas le cas pour FRANCIS !

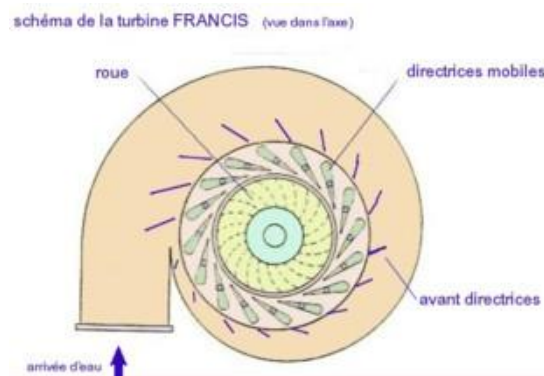


Figure III.3. La turbine radiale centripète FRANCIS

Toujours au milieu du XIXe, un autre ingénieur français Louis-Dominique GIRARD met au point une turbine dont l'aspect rappelle une roue à aubes, c'est une machine dite à impulsion, son fonctionnement s'apparente à celui d'une turbine radiale centrifuge, mais à injection partielle à un ou plusieurs jets, sous pression et réglables. Turbine adaptée aux hautes chutes, ce sera à la fin du XIXe, la turbine de référence dans les Alpes françaises.

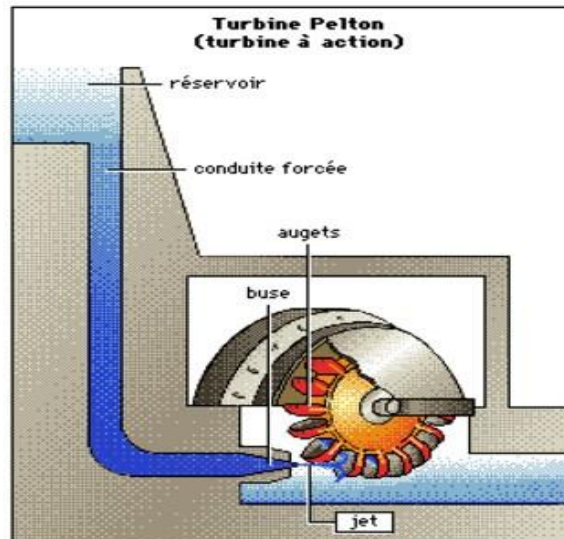


Figure III.4. Turbine Pelton

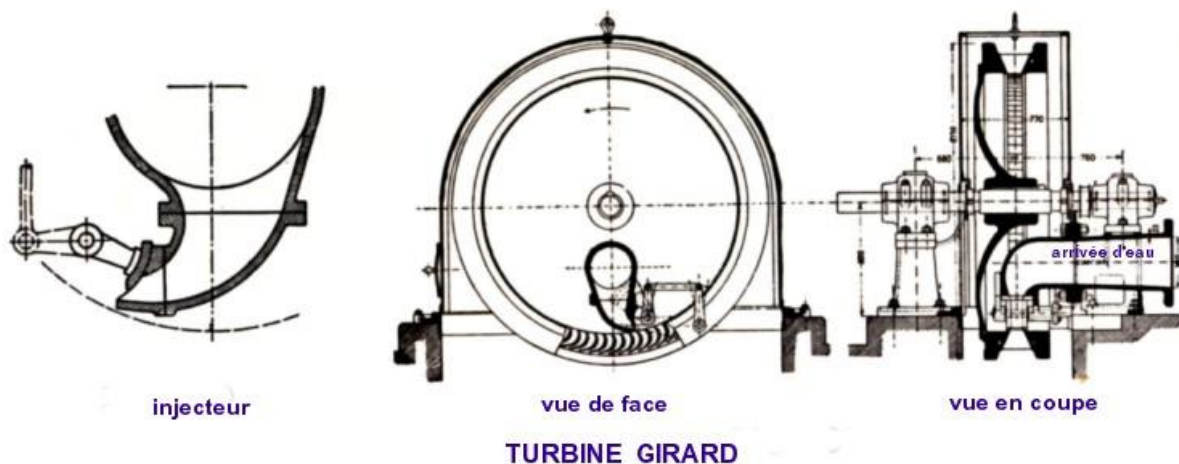


Figure III.5. Turbine GIRARD

On vient de le voir, la turbine hydraulique apparaît au XIXe, mais son utilisation est limitée par la mise à disposition d'une énergie mécanique utilisable sur place. Par différents procédés on parvenait à la transmettre sur quelques dizaines de mètres, voire quelques centaines : courroies, barres articulées, câbles téléodynamiques, eau sous pression, mais le

moyen le plus répandu et le plus efficace était l'air comprimé. Très utilisé dans l'industrie minière, l'air comprimé trouvera un large débouché dans le percement des tunnels ferroviaires des Alpes, où il était facile de trouver un torrent pour y installer une turbine avec un compresseur d'air.

A ce stade du développement la machine à vapeur offrait encore une supériorité indéniable. En effet pour bénéficier de l'énergie hydraulique, non transportable, il était indispensable de disposer d'un cours d'eau ou d'une chute d'eau, tandis que le charbon utilisé dans la machine à vapeur était livrable sur le lieu d'utilisation. A contrario, l'eau présentait l'avantage d'un coût presque nul [18].

III.1.C. Différents types des turbines hydrauliques

III.1.C.1. Les turbines à Action

Les turbines à action sont dénoyées, c'est à dire qu'elles ne sont pas entourées d'eau. L'énergie produite dépend uniquement des conditions de l'écoulement avant la roue. Un jet libre agit sur des augets ou des aubes profilées placées sur la périphérie d'une roue (action). Ce jet exerce une force sur l'auget en mouvement de rotation, qui est transformée en couple et puissance mécanique sur l'arbre de la turbine. La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aubage est entièrement sous forme d'énergie cinétique. L'échange d'énergie entre l'eau et l'aubage a lieu à pression constante, généralement la pression atmosphérique. La roue de la turbine dénoyée tourne dans l'air [19].

III.1.C.2. Turbine Pelton

La turbine à action typique est la turbine Pelton. L'énergie potentielle de l'eau est transformée en jet qui frappe une roue, constituée principalement de godets et d'un moyeu, et l'entraîne en rotation.

L'un des moyens pour résoudre cette nécessité en énergie est d'utiliser l'énergie hydraulique et les turbines Pelton en particulier. En effet, ce type de turbine convient très bien pour les grandes hauteurs hydrauliques et les petits débits. Elles ont de plus un bon rendement pour les petites et moyennes puissances (de quelques centaines de watts à quelques centaines de kilowatts), ce qui est souvent le cas des applications dans les pays en voie de développement. Enfin, elles sont relativement faciles à réaliser localement.

Dans une telle turbine, le couple est généré par la force exercée par un jet d'eau provenant d'un injecteur sur un ensemble d'augets que l'on pourrait comparer à des sortes de cuillères fixées sur un rotor. Les augets sont profilés pour obtenir un rendement maximum tout en permettant à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue [19].

La turbine Pelton présente un rendement supérieur à 80% pour des débits d'eau compris entre 25% et 100%. Son domaine d'utilisation ce sont les faibles débits ($Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$) et les hautes chutes jusqu'à une hauteur... illimitée, si ce n'est par la résistance des matériels, certaines installations dépassent les 1000m de hauteur de chute, le record est de 1883 mètres (centrale de Bieudron, en Suisse).

III.1.C.3. Turbine Crossflow

La turbine Crossflow, appelée aussi turbine à flux traversant, est une machine à action qui a ceci de particulier que l'eau traverse deux fois la roue.

De construction simple, elle est constituée de trois parties principales :

- un injecteur de section rectangulaire et dont le débit est réglé à l'aide d'une aube profilée rotative, similaire à une vanne papillon. Afin d'assurer un arrêt de la turbine sans énergie d'appoint, la fermeture est souvent réalisée à l'aide d'un contrepoids, et l'ouverture par un vérin hydraulique;
- une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilées;
- un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

La turbine Crossflow est de construction simple, ce qui a conduit à sa popularité dans les pays en voie de développement.

La roue, traversée deux fois par l'eau, est autonettoyante: les débris bloqués sur l'aubage à l'entrée de la roue sont chassés par l'eau qui en sort.

En contrepartie, le rendement maximum de ce type de turbine est moyen et reste compris, pour une machine de bonne qualité, entre 80 et 83%.

La vitesse de rotation est généralement basse ce qui fait qu'un multiplicateur à engrenages ou à courroie doit être intercalé entre turbine et générateur.

Cette machine peut être aussi source de bruit et de vibrations générés par le choc périodique de l'eau sur les aubes cylindriques de la roue qui sont relativement élastiques (lames d'acier).

Lorsque la turbine Crossflow travaille sous de faibles chutes et avec un niveau aval variable, elle peut être équipée d'un aspirateur qui permet de récupérer entre la moitié et les trois quarts de la hauteur d'aspiration. Pour ce faire, le bâti de la turbine est doté d'une soupape d'admission d'air prérégulée pour maintenir la dépression nécessaire à la sortie de la roue [20].

III.1.C.4. Les turbines à Réaction

Une turbine à réaction est une machine fermée (noyée) qui utilise à la fois la vitesse de l'eau (énergie cinétique) et une différence de pression. Les turbines à réaction fonctionnent complètement immergées. Le transfert d'énergie à la turbine dépend des conditions de l'écoulement avant et après la roue.

Deux principes sont à la base de son fonctionnement :

- La création d'un tourbillon au moyen d'une bache spirale, d'aubages directeurs,

ou les deux à la fois,

- La récupération du mouvement circulaire du tourbillon par les aubages d'une roue en rotation qui dévient les filets d'eau pour leur donner une direction parallèle à l'axe de rotation. Ces aubages se comportent comme une aile d'avion : l'écoulement de l'eau provoque sur le profil de l'aube une force hydrodynamique qui induit un couple sur l'arbre de la turbine.

III.1.C.5. Turbine Francis

Les turbines Francis sont des machines dites à réaction, compactes, robustes et utilisées pour des chutes moyennes, pouvant développer des puissances très importantes. Leur rendement peut dépasser les 80 %. On les appelle turbines à réaction lorsque la pression à l'entrée de la roue est supérieure à la pression de sortie de la roue. Les éléments d'une turbine Francis sont : Une bêche spirale où volute qui alimente le distributeur. C'est une conduite en forme de colimaçon de section progressivement décroissante reliée, d'une part, à l'extrémité aval de la conduite forcée, et d'autre part, à la section d'entrée du distributeur. La volute est tracée de telle façon que le débit passant à travers chaque arc de cercle de la section d'entrée du distributeur soit constant. Le distributeur est placé au milieu de l'anneau de la bêche spirale. Ses aubes orientables, placées dans le prolongement des entretoises, permettent d'ajuster le débit-volume turbiné. Le moment cinétique ainsi absorbé produit le couple transmis à l'arbre de la turbine. Le diffuseur reçoit l'eau à la sortie de la roue et le conduit à la sortie de la turbine. Comme son nom l'indique, il permet d'abaisser la pression en sortie de roue, sous l'effet du dénoyage éventuel de la machine et grâce à une augmentation progressive de sa section de passage.

III.1.C.6. Turbines hélice et Kaplan

Les turbines Kaplan et hélice sont des machines à réaction et à injection totale adaptées aux faibles chutes et aux débits élevés (la turbine Kaplan est à pales réglables en marche, la turbine hélice est à pales fixes). Leur structure générale est la même que celle des turbines Francis à axe vertical. L'écoulement dans le rotor est néanmoins purement axial.

La turbine Kaplan est utilisée dans une gamme de chute comprise environ entre 12 et 60 m. Ses performances sont élevées sur une large variation de chute et de charge, grâce à son double réglage conjuguant les positionnements des pales et du vannage.

L'état actuel de la technologie permet de concevoir des machines de grandes dimensions réalisées en sous-ensembles transportables, jusqu'à des diamètres de roue de

III.2. Les compresseurs

III.2.A. Introduction sur les Compresseurs

Un compresseur est une machine qui a pour fonction d'élever la pression du fluide compressible qui le traverse. Son nom traduit le fait que le fluide se comprime (son volume diminue) au fur et à mesure de l'augmentation de pression. L'élévation de pression d'un gaz pour un compresseur est utilisée pour atteindre un niveau de pression déterminé par des processus tels que :

- Les réactions chimiques (pression convenable le catalyseur).
- Le stockage dans les cavités.
- La liquéfaction ou la séparation.
- Les cycles de réfrigération.
- L'alimentation des réseaux d'air comprimé...etc.

III.2.B. Classification des compresseurs

Les compresseurs peuvent être classés selon les caractéristiques suivantes :

- le principe de fonctionnement (volumétrique, dynamique).
- mouvement des pièces mobiles (mouvement linéaire, rotatif).
- les compresseurs d'air.
- les compresseurs des gaz.

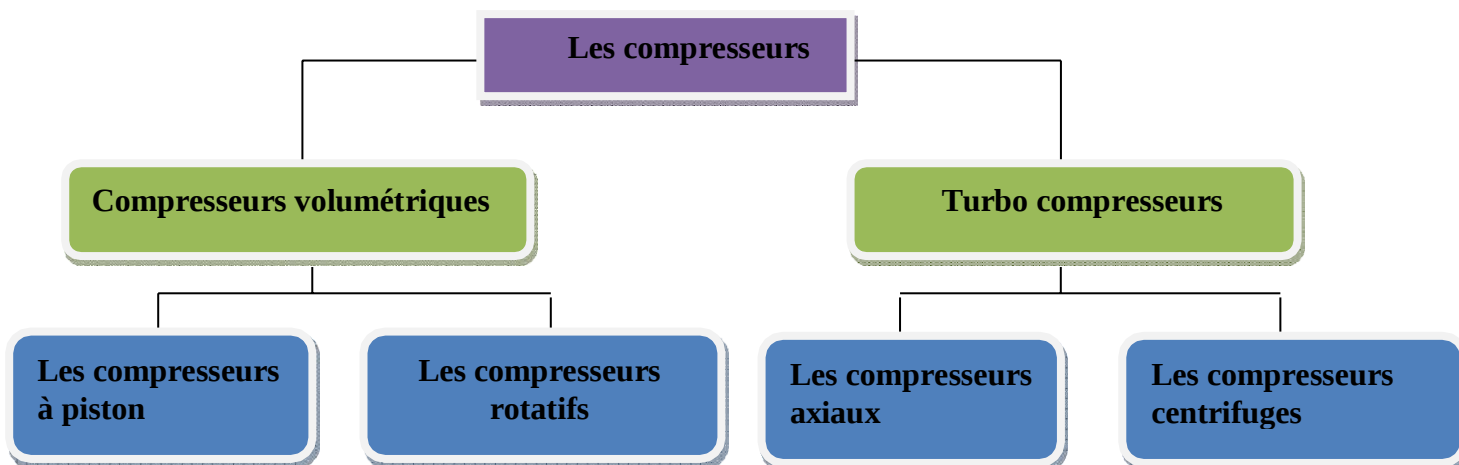


Figure III.8. Classification les compresseurs

Dans les turbocompresseurs, l'élévation de la pression résulte précisément d'une action sur la vitesse de fluide. Ici encore, l'énergie nécessaire au fonctionnement du compresseur est dépensée sous forme de travail, celui-ci est transformé sous forme d'énergie cinétique au fluide à comprimer, et cette dernière à son tour est transformée en pression. La mise en vitesse est obtenue en soumettant le fluide à l'action des roues à aubes ayant une grande vitesse rotative.

Ces machines assurent la compression grâce à la force centrifuge, due au mouvement de rotation des roues munies d'aubes ou d'ailettes.

On distingue deux types de turbocompresseurs :

- **Compresseurs axiaux** : Les compresseurs axiaux sont des machines réceptrices à écoulement axial du compressible, ils sont utilisés dans les turbines à grande puissance et dans les turboréacteurs d'aviation, ils sont caractérisés par le nombre d'étage important et le taux de compression n'est pas élevé.
- **Compresseurs centrifuges** : Les compresseurs centrifuges augmentent l'énergie du gaz comprimé grâce à la force centrifuge qui est provoquée par le mouvement de rotation des roues à aube.

III.2.C. Principe de fonctionnement

Le **turbocompresseur** est en effet un compresseur d'air entraîné par les gaz d'échappement. Les gaz d'échappement sortant du moteur par le collecteur d'échappement sont dirigés vers la chambre de turbine dans laquelle se trouve le rotor. À travers d'un arbre commun, il entraîne le rotor du compresseur, situé de l'autre côté du dispositif (souvent appelé « froid », qui comprime l'air alimentant le moteur. Puisque l'air comprimé contient plus d'oxygène dans une unité de volume, il devient possible de créer de meilleures conditions du processus de combustion. Une plus grande quantité d'air combiné à une quantité supplémentaire de carburant peut être utilisée pour augmenter la puissance de moteur ou, comme dans le cas des moteurs diesel, permet une meilleure combustion, en réduisant considérablement la quantité de polluants émis et en augmentant l'efficacité du moteur.

En augmentant la compression de l'air, et donc la quantité de gaz dans la même unité de volume, on augmente en même temps sa température. Plus la température est élevée, plus la densité est faible, ce qui signifie que les cylindres reçoivent moins d'oxygène que si la

température de l'air était plus basse. C'est pourquoi on utilise un refroidisseur d'air de suralimentation (intercooler). Généralement, il s'agit d'un échangeur de chaleur de type air-air ou (moins souvent) air-eau. [22]

III.2.D. But de la compression

La compression en générale, peut être imposée par la nécessité technique de déplacer une certaine quantité de gaz d'un système à une certaine pression, vers un autre système à une autre pression plus élevée. Cette opération a pour but de :

- Faire circuler un gaz dans un circuit fermé.
- Produire des conditions favorables (de pression) pour des réactions chimiques.
- Envoyer un gaz dans un pipe line de la zone de production vers l'utilisateur.
- Obtenir de l'air comprimé pour la combustion.
- Récupérer du gaz.

III.2.E. Conditions de fonctionnement

Les conditions de fonctionnement d'un turbo sont parmi les plus sévères que l'on puisse trouver dans toute l'industrie mécanique. Jugez plutôt :

- **Température:** les gaz d'échappement d'un moteur diesel peuvent atteindre 830°C (et même 860°C sur les futurs moteurs en développement). Pour l'essence, c'est pire : 1000°C voire 1050°C.

La roue turbine et son carter doivent donc supporter non seulement une telle température, mais surtout les montées/descentes de température. Il y a donc des phénomènes de fatigue thermomécanique sur la roue et le carter turbine. On est, dans la majorité des cas, capable de les expliquer et de les résoudre par la simulation et par la conception.

La dilatation de l'ensemble ne doit pas créer d'efforts énormes sur les pièces, sous peine de les casser. Également, il peut se produire un phénomène de retour de chaleur quand on coupe le moteur après avoir utilisé le turbo : le côté turbine est chaud, le moteur s'arrête ; les gaz d'échappement stagnent dans le carter, et la température, plutôt que d'être évacuée, est transmise par conduction jusqu'au carter central, pouvant brûler l'huile située sur les paliers, ce qui peut être catastrophique au niveau de leur usure. Ceci est également en passe d'être modélisable.

- **Vitesse et vibrations** : le groupe tournant atteint généralement des vitesses de l'ordre de 150 000 à 200 000 tours/min. Sur les petits turbos, parfois 250 000 tours/min.

Ce groupe tournant doit donc être parfaitement équilibré. S'il y a un balourd (une masse résiduelle située à une certaine distance de l'axe), la force centrifuge peut induire des problèmes de bruit (pas très gênant pour la compétition) ou de casse. C'est un problème majeur. Il existe plusieurs solutions pour l'équilibrage, qui chacune ont leurs propres avantages, problèmes et inconvénients.

L'assemblage du turbo, du collecteur d'échappement (parfois intégré en une seule pièce au carter de turbine, par exemple sur les moteurs Volkswagen) et du système d'échappement (catalyseur, etc.) doivent être montés suffisamment rigidement pour supporter les vibrations du moteur, et de manière suffisamment souple pour ne pas créer d'efforts lorsque le turbo est chaud.

Il existe également des problèmes vibratoires sur l'actuateur et son support, qui, lui aussi, à son échelle, doit être suffisamment rigide.

- **Huile** : L'huile provient du même système de lubrification que celui du moteur. Parfois, l'huile est donc loin d'être saine et le turbo doit supporter cela.

Il y a plusieurs raisons pour lesquelles un turbo peut casser :

Cause la plus souvent observée : usure/casse des paliers, due à plusieurs raisons :

- * Une huile contaminée ou sale
- * Cokéfaction de l'huile en cas de retour de chaleur
- * Un problème de pression d'huile
- * Un groupe tournant mal équilibré
- * Un groupe tournant qui se déséquilibre avec le temps, par exemple si une ailette est endommagée

Contraintes thermomécaniques (fissuration de la turbine ou de son carter)

Un FOD (Foreign Object Damage), endommagement d'une roue/ailette causé par un objet étranger (morceau de métal, de joint) passant dans la turbine ou le compresseur et frappant une ailette tournant à 200000 RPM... Imaginez le résultat.

- Casse par vibration des ailettes ou des roues,
- Casse par vibration du carter turbine,
- Casse des joints, des vis, des colliers. [23]

Références bibliographiques

- [1]: Messai A I, Messai A L., 2015. L'étude De La Possibilité D'utilisation D'une Colonne De Prédistillation Avec L'augmentation De La Capacité 20% De L'unité 11 De La Raffinerie De Skikda . Mémoire de Master Académique : Raffinage Et Pétrochimie. Université Echahide Hamma Lakhdar-EL-Oued
- [2]: J.P.WAUQUIER : Le Raffinage du pétrole brut, Tome 1, Edition TECHNIP 1994 – Paris, p 3 – 13.
- [3]: Science de l'ingénieur et des technologies, université de Dschang- Cameron
<http://afrostylingenieur.unblog.fr>
- [4] : Gilbert Drouin, « Eléments de machine », 2^{eme} Edition, Canada, (1986), p. 373–387.
- [5] : <http://leslubrifiants.com/2017/02/01/lhistoire-de-la-lubrification/>.
- [6] : Les lubrifiants par Gérard Gomez
<https://tice.ac-montpellier.fr/ABCDORGA/Famille5/Produit5/LUBRIFIANTS.htm>
- [7] : JEAN-PIERRE WAUQUIER, JEAN-PIERRE FAVENNEC, « Le raffinage du pétrole: Pétrole brut, produits pétroliers, schémas de fabrication », Edition Technique, vol.1, Paris, 1994, p. 283, 285, 291.
- [8] : Ronald Breslow, « La chimie aujourd'hui et demain: une science centrale, utile et créative », Belgique, 2001.
- [9] : Lubrification et graissage Nader BENSALÉM.
- [10] : Mahoney C.L., B. E. (1962). Polyphenyl Ethers.In SyntheticLubricants
- [11] : Denis, B. (1997). Physico-Chimie des lubrifiants. Technip: Analyses et essais, Publication de l'institut français du pétrole, ed.Technip
- [12] : Sillon. (2003). Les lubrification pour automobiles. Société Français des chimistes l'actualitéchimique
- [13] : Benssaada, F. (2002). La Maintenance Industrielle. Office des Publications Universitaires.
- [14] : Born .M, et al (1998). Lubrifications et fluides pour l'automobile. Paris: Technip
- [15] : <http://joho.p.free.fr/EC/COURS%20DOC/Lubrification/LES%20ADDITIFS.pdf>
- [16] : <https://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Lubrifiants>
- [17] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_hydraulique

- [18] : <http://www.hydrelect.info>
- [19] : Mémoire de fin d'études études des composants d'une turbine Pelton, <https://www.rapport-gratuit.com/memoire-de-fin-detudes-etudes-des-composants-dune-turbine-pelton/>
- [20] : Turbine hydraulique Pacer1995, 134 pages N° de commande 724.247.1f
- [21] : Turbines hydrauliques, description et fonctionnement, <https://www.techniques-ingenieur.fr>
- [22] : les turbocompresseurs .odt, version du 15 avr.2012.
- [23] : les turbocompresseurs version de novembre-07 –CCH LAURENT. –SDIS 42