

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Thème proposé par General Electric

**Analyse du dysfonctionnement des  
accumulateurs hydrauliques de la station de  
production électrique de Hadjret Enouss**

AMRANI Lamia / KHALFI Hidayette

Sous la direction de

Pr Saâdia BENMAMAR (ENP)  
M<sup>f</sup> Houssef ZOUGHMAR (General Electric)  
M<sup>f</sup> Houssam-eddine GAMAL (General Electric)

Présenté et soutenu publiquement le 18 Juin 2017

Composition du Jury :

Président	M <sup>f</sup> Maamar Nakib	MCB	ENP
Promoteur	M <sup>me</sup> Saâdia BENMAMAR	Professeur	ENP
	M <sup>f</sup> Hossam-eddine GAMAL		General Electric
	M <sup>f</sup> Houssef ZOUGHMAR		General Electric
Examineur	M <sup>f</sup> Salim BENZIADA	MAA	ENP
Invité	M <sup>f</sup> Nazim BENBEY		General Electric

ENP 2017



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Thème proposé par General Electric

**Analyse du dysfonctionnement des  
accumulateurs hydrauliques de la station de  
production électrique de Hadjret Enouss**

AMRANI Lamia / KHALFI Hidayette

Sous la direction de

Pr Saida BENMAMAR (ENP)  
M<sup>f</sup> Houssef ZOUGHMAR (General Electric)  
M<sup>f</sup> Houssam-eddine GAMAL (General Electric)

Présenté et soutenu publiquement le 18 Juin 2017

Composition du Jury :

Président	M <sup>f</sup> Maamar Nakib	MCB	ENP
Promoteur	M <sup>me</sup> Saâdia BENMAMAR	Professeur	ENP
	M <sup>f</sup> Hossam-eddine GAMAL		General Electric
	M <sup>f</sup> Houssef ZOUGHMAR		General Electric
Examineur	M <sup>f</sup> Salim BENZIADA	MAA	ENP
Invité	M <sup>f</sup> Nazim BENBEY		General Electric

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à*

*La mémoire de mon père avec lequel je n'aurais pas le plaisir de partager cet événement, mais qui est et demeurera à tout jamais dans mon cœur. Un père assurément fière des membres de sa famille et que j'espère fière de moi aujourd'hui.*

*Aux beaux yeux de ma mère, pour tout le soutien qu'elle m'a apporté et pour tout l'amour qu'elle m'a porté.*

*Mes sœurs Mina, Meriem, Ferial, mon frère Adel, et mes amours de neveux et nièces, les étoiles qui ont toujours guidé mon trajet en y apportant bonheur et joie.*

*Ma jumelle Sara sans laquelle la vie n'aurait certainement pas le même goût.*

*Mes beaux frère Amine et Youcef pour leurs perpétuels encouragements.*

*Mes meilleurs amis, Khadidja ; Taïa et Hichem, mes camarades de vie, merci pour tous les rires qu'on a partagés.*

*Tous mes amis proches, que je ne connais pas depuis toute une vie mais que je garderai à jamais. Mes amis du CAP, de la Cellule et de la 204 pour tous les bons moments qu'ils m'ont fait vivre.*

*A ma binôme, pour toutes les étapes qu'on a traversé ensemble et sa bonne humeur.*

*A toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin.*

*Lamia*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste mémoire à*

*Mes parents, aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour  
exprimer mon amour pour eux.*

*Mes adorables sœurs Anfel, Douaa et Hadil pour leur amour et  
encouragement.*

*Mon fiancé, pour son soutien, son amour et tout le bonheur qu'il  
m'apporte.*

*Ma famille, mes amis et tous ceux qui me sont chers.*

*Ma binôme pour son grand cœur et sa patience.*

*Hidayette*

## *Remerciements*

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la patience d'accomplir ce travail.

Nous remercions également toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

En commençant, en premier lieu, par remercier le professeur *Saida BENMAMAR*, de nous avoir fait l'honneur de nous encadrer. Nous tenons à la remercier pour tout le soutien qu'elle nous a apporté, sa disponibilité, ses conseils avisés et les connaissances qu'elle a généreusement partagées avec nous afin de mener à bien ce présent travail.

Nous remercions aussi Mr Nacer MOUDOUD pour tous les efforts qu'il a fournis afin de nous aider dans l'élaboration de nos essais pratiques.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des employés de General Electric pour toute l'aide qu'ils nous ont apporté : à *Mr Midhat MIRABI* pour nous avoir accueilli au sein de GE Power, à *Mr Hossam GAMAL* et *Mr Mourad BOURNANE* pour nous avoir proposé ce projet, à *Mme Wafaa KHAMMAR* pour son immense générosité, son soutien et sa disponibilité, à *Housseem ZOGHMAR* pour son aide précieuse.

De plus nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui nous ont aidées au sein de l'entreprise : *Mr Abdeslem BAHET*, *Mr Mohammed ZEMOUCHI*, *Mr Farid DJOUADI*, *Mme HADDAD Fatima* ainsi que *Lidya* et *Djazia* pour leur aide inestimable et leur accueil.

Un énorme merci à *Mr Nazim BENBEY* pour tout ce qu'il nous a appris, sa bonne humeur et sa disponibilité, et pour nous avoir permis de vivre l'expérience General Electric.

Nous exprimons toute notre gratitude à l'ensemble des enseignants du Département d'Hydraulique, à l'Ecole Nationale Polytechnique auxquels nous devons notre formation d'ingénieur.

Enfin, nous remercions vivement les membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer notre travail.

Merci à vous tous.

AMRANI Lamia  
KHALFI Hidayette

## **ملخص:**

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة الخلل في المركمات، التي تلعب دورا فعالا في تخزين الطاقة في نظام الشحن الهيدروليكي لتوربينات الغاز. أنها تساعد على امتصاص نبضات الضغط وتعمل على تعويض امتصاص السوائل الناتجة عن التقلبات في درجات الحرارة. الشروط المفروضة من أجل الأعمال التجريبية الخاصة بهذه الأطروحة هي، من جهة، تحليل زيت التحكم ودراسة خصائصه الفيزيوكيميائية ومن جهة أخرى التطرق للمحاكاة بالاستعانة بعدة برامج مختلفة باستخدام الخصائص المقاسة.

يستند النهج المتبع في هاته الأطروحة على إمكانية محاكاة التدفقات وذلك من أجل عدة قيود مختلفة في مركم ذو مثناة، الهدف من هذا معالجة مشكلة انفجار المثناة.

## **الكلمات الدالة:**

المركمات، زيت، مثناة، كومسول، سوليد ووركس.

## **Abstract :**

The aim of our thesis is to study accumulator's bladder failure. Bladder- or bag-type accumulators consist of a shell or case with a flexible bladder inside the shell; it stores hydraulic energy in order to dampen pressure pulsations and to compensate temperature fluctuations.

We analyzed oil quality and studied its properties; the obtained results have been used during the simulation done with Comsol and SolidWorks. The approach followed in this thesis is based on the possibility of simulating the flows under different values of pressure.

## **Key words :**

Accumulator, Bladder, Comsol, Oil, Solidworks.

## **Résumé :**

L'objectif de notre thèse est d'étudier le dysfonctionnement des accumulateurs, qui jouent un rôle crucial dans le stockage d'énergie dans un système d'alimentation hydraulique d'une turbine à gaz. Ils permettent d'amortir les pulsations de pression et de compenser l'absorption du fluide due aux fluctuations de température. Les impératifs qui se sont imposés pour les travaux expérimentaux de cette thèse étaient, d'une part, d'analyser l'huile de commande et étudier ses propriétés physico-chimiques et d'autre part procéder à une simulation avec deux différents logiciels en utilisant les propriétés mesurées.

La démarche suivie dans ce mémoire est basée sur la possibilité de simuler les écoulements, sous différentes contraintes, dans un accumulateur à vessie et ce pour répondre à la problématique de l'éclatement de la vessie.

## **Mots clés :**

Accumulateur, huile, vessie, SolidWorks, Comsol.

# Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des photos

Liste des abréviations

<b>Introduction générale.....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre I : Présentation de l'entreprise .....</b>	<b>16</b>
I.1.    Aperçu général sur l'entreprise .....	16
I.1.1.    Le conglomérat General Electric .....	16
I.1.2.    Historique .....	16
I.1.3.    GE en Algérie .....	17
I.2.    GE Power Services Algérie.....	19
I.2.1.    Activité .....	19
I.2.2.    Les réalisations en Algérie .....	22
<b>Chapitre II : Station de Hadjret Enouss .....</b>	<b>25</b>
II.1.    Introduction.....	25
II.2.    Localisation et présentation générale.....	25
II.3.    Description de la centrale.....	26
II.3.1.    Principe de fonctionnement.....	26
II.3.2.    Configuration et équipements .....	27
II.4.    Diagnostic et problématique .....	31
<b>Chapitre III : Description du système hydraulique .....</b>	<b>34</b>
III.1.    Introduction .....	34
III.2.    Généralités .....	34
III.3.    Principe de fonctionnement.....	34
III.4.    Description.....	35
III.4.1.    Circuit hydraulique .....	35
III.4.2.    Types de circuit.....	36
III.5.    Constituant du système hydraulique.....	36
III.5.1.....	36
III.5.2.....	39
III.5.3.....	40
III.6.    Schématisation du circuit.....	44
III.6.1.    Schéma de l'installation .....	44

III.6.2.	Symboles des composants.....	45
<b>Chapitre IV :</b>	<b>Les accumulateurs hydrauliques .....</b>	<b>48</b>
IV.1.	Introduction .....	48
IV.2.	Généralités.....	48
IV.4.	Principe de fonctionnement.....	49
IV.5.	Fonctions de l'accumulateur .....	50
IV.3.	Types d'accumulateurs.....	51
IV.3.1.	Accumulateur à diaphragme .....	51
IV.3.2.	Accumulateur à piston .....	51
IV.3.3.	Accumulateur à vessie .....	51
IV.6.	Installation des accumulateurs.....	52
IV.6.1.	Considérations .....	52
IV.7.	Conclusion.....	54
<b>Chapitre V :</b>	<b>Les fluides hydrauliques.....</b>	<b>56</b>
V.1.	Introduction.....	56
V.2.	Généralités sur les fluides hydrauliques .....	56
V.3.	Fonctions et sollicitations des fluides hydrauliques .....	56
V.3.1.	Résistance à la dégradation .....	58
V.3.2.	Pouvoir lubrifiant .....	58
V.3.3.	Caractéristiques de viscosité .....	58
V.3.3.	La corrosion .....	59
V.4.	Classification des fluides hydrauliques .....	59
V.5.	Propriétés des fluides hydrauliques .....	60
V.5.1.	La masse volumique.....	60
V.5.2.	La viscosité .....	62
V.6.	Conclusion .....	65
<b>Chapitre VI :</b>	<b>Analyse des fluides hydrauliques : Huile de l'accumulateur étudié.....</b>	<b>68</b>
VI.1.	Introduction .....	68
VI.2.	Théorie des méthodes de mesure.....	68
VI.2.1.	La masse volumique .....	68
VI.2.2.	La viscosité .....	71
VI.3.	Mesures des caractéristiques de l'huile utilisé dans l'accumulateur d'étude .....	74
VI.3.1.	Propriétés à analyser .....	75
VI.4.	Conclusion.....	81
<b>Chapitre VII :</b>	<b>Simulation.....</b>	<b>83</b>

VII.1.	Introduction.....	83
VII.2.	Principe de fonctionnement et rôle des simulations.....	83
VII.3.	Aperçu sur les simulateurs .....	84
VII.3.1.	COMSOL .....	84
VII.3.2.	SolidWorks .....	85
VII.4.	Application sur l'huile et la vessie de l'accumulateur étudié .....	86
VII.4.1.	Simulation de l'Écoulement de l'huile dans l'accumulateur via SolidWorks .....	86
VII.4.2.	Simulation via COMSOL.....	93
VII.5.	Interprétation générale .....	97
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>98</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>99</b>

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques des centrales en Algérie .....	22
Tableau II.1 : Sommaire des caractéristiques de la centrale .....	27
Tableau II.2 : Caractéristiques de la vapeur basse, moyenne et haute pression.....	29
Tableau III.1 : Symboles des composants du schéma hydraulique.....	45
Tableau V.1 : Masses volumiques des principales huiles .....	60
Tableau VI.1 : (a) et (b) : Tableaux de correction de l'énergie cinétique .....	77
Tableau VI.2 : Résultats des essais de viscosité sur l'huile de bonne qualité.....	79
Tableau VI.3 : Résultats des essais de viscosité de l'huile dégradée.....	79
Tableau VI.4 : Résultats des essais de masse volumique au densimètre digital .....	81

## Liste des figures

Figure I.1 : Structure du business GE Power .....	18
Figure I.2 : Composition d'une turbine à gaz.....	19
Figure I.3 : Composition d'une turbine à vapeur .....	20
Figure I.4 : Les degrés d'une inspection de démontage .....	22
Figure II.1 : Localisation de la station de Hadjret Enouss .....	25
Figure II.2 : Schématisation du cycle combiné .....	26
Figure III.1 : Pompes volumétriques.....	38
Figure III.2 : Pompes non volumétriques.....	38
Figure III.3 : Les types de pompes .....	39
Figure III.4 : Vérin simple effet (a) et double effet (b) .....	40
Figure III.4 : Schéma du système hydraulique étudié.....	45
Figure V.1 : Variation de la masse volumique en fonction de la température.....	61
Figure V.2 : Variation de la masse volumique en fonction de la pression.....	62
Figure V.3 : Variation de la viscosité en fonction de la température.....	64
Figure VI.1 : Mesure à l'aéromètre.....	69
Figure VI.2 : Mesure au pycnomètre .....	69
Figure VI.3 : Viscosimètre de Couette.....	71
Figure VI.4 : Viscosimètre Cône sur plan.....	72
Figure VI.5 : Viscosimètre à chute libre .....	73
Figure VI.6 : Viscosimètre capillaire d'Ostwald .....	74
Figure VI.7 : Interprétation des essais de viscosité e la nouvelle huile .....	79
Figure VI.8 : Interprétation des essais de viscosité de l'huile usée.....	80
Photo VI.2. Essai de masse volumique au densimètre digital.....	81
Figure VII.1 : Ecoulement de l'huile de bonne qualité dans l'accumulateur.....	91
Figure VII.2 : Ecoulement de l'huile dégradée dans l'accumulateur.....	91
Figure VII.3. : Evolution de la pression le long de l'accumulateur (cas de l'huile de bonne qualité).....	92
Figure VII.4. : Evolution de la pression le long de l'accumulateur (cas de l'huile dégradée). 92	
Figure VII.5 : Répartition de la pression sur COMSOL .....	96

## Liste des photos

Photo VI.1. Essai de viscosité par viscosimètre capillaire d'Ostwald .....	76
Photo VII.1. Esquisse de l'accumulateur .....	86
Photo VII.2. Sélection de l'assemblage pour la simulation .....	87
Photo VII.3. Introduction des paramètres de la simulation.....	88
Photo VII.4. Sélection des faces concernées par la simulation.....	88
Photo VII.5. Introduction des conditions aux limites.....	89
Photo VII.6. Lancement du calcul.....	89
Photo VII.7. Préparation des résultats .....	90
Photo VII.8. Choix du domaine .....	93
Photo VII.9. Choix de la physique et de l'étude .....	94
Photo VII.10. Importation de la géométrie de la vessie .....	94
Photo VII.11. Introduction des conditions aux limites.....	95
Photo VII.12. Insertion du maillage .....	96

## Liste des abréviations

CIS : Commonwealth of Independent States

ASEAN : Association of Southeast Asian Nations

GE : General Electric

USAF : United States Air Force

GPS : Gas Power System

PS : Power Services

SKH : Shariket Kahraba Hadjret Enouss

SpA : Société par Action

SNC : SNC Lavalin

AEC : Algerian Energy Company

HRSG : Heat Recovery Steam Generator

HPU : Hydraulic Pressure Unit

## Introduction générale

Le système d'alimentation hydraulique fournit le fluide nécessaire au bon fonctionnement des équipements de commande de la turbine à gaz, ce fluide assure l'ouverture et la fermeture des soupapes d'arrêt du combustible, il contrôle également le mouvement des aubes directrices ainsi que les dispositifs de déclenchement des appareils responsables de la protection de la turbine. Il est composé essentiellement d'une pompe principale, une pompe auxiliaire, un collecteur d'alimentation et un accumulateur.

Le fluide hydraulique, l'huile dans notre cas, est propulsé via des pompes à partir d'un réservoir à une pression bien déterminée. Le dysfonctionnement des pompes entraîne une chute de pression dans le système et par conséquent un arrêt de la machine, Cela signifie une suspension de la production d'électricité ainsi qu'un endommagement de certains éléments appartenant au système. Du fait de l'importance du maintien de la pression dans le système hydraulique, il est impératif d'introduire des accumulateurs dans l'installation.

Les accumulateurs donnent une apparence de compressibilité à un liquide incompressible en emmagasinant un volume variable d'un liquide sous la pression d'un gaz pour le restituer au système hydraulique selon le besoin. En général, les accumulateurs agissent uniquement dans les conditions extrêmes, à savoir : une chute ou une hausse de pression. D'où l'importance du temps de restitution, les accumulateurs à vessie assurent un temps de réponse très court comparé à celui obtenu avec des accumulateurs à piston ou à diaphragme.

Les travaux entrepris dans cette thèse s'inscrivent dans une démarche visant à étudier l'éclatement de la vessie d'un accumulateur hydraulique. Différentes hypothèses sont émises, entre autres, la dégradation de la qualité de l'huile, une hausse de pression, la présence de microfissures au niveau de la vessie...

Pour ce faire, le présent manuscrit est scindé en 7 parties :

Le premier et le second chapitre présentent l'entreprise General Electric et la station de Hadjret Enouss. Le troisième chapitre est consacré au système d'alimentation hydraulique et ses différents composants,

Dans le quatrième chapitre, nous évoquons succinctement les différents types d'accumulateurs hydrauliques qui représentent l'élément principal de notre étude. Nous y détaillons leurs caractéristiques principales, leurs principes de fonctionnement et les propriétés à prendre en compte lors du choix du type d'accumulateurs.

Le cinquième chapitre établit un bilan des résultats obtenus à partir des essais physico-chimiques réalisés sur les échantillons d'huile de commande, à l'état neuf et dégradé, ces

analyses nous ont permis d'acquérir une large base de données expérimentales qui nous a permis de procéder aux simulations d'écoulements réalisées avec deux différents logiciels ; SolidWorks et Comsol. L'étude numérique et comparative est présentée dans le sixième chapitre.

Nous clôturons notre manuscrit par l'interprétation des résultats obtenus ainsi que quelques suggestions.

---

# **CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE**

---

## Chapitre I : Présentation de l'entreprise

### I.1. Aperçu général sur l'entreprise

#### I.1.1. Le conglomérat General Electric

Une entreprise conglomérale possède des activités dans des domaines différents et non liés. General Electric en est un exemple concret avec ses trente-six (36) divers business, présents dans plus de cent trente-sept (137) pays répartis en sept (7) régions à savoir : Australasia, Canada, Amérique latine, Afrique du Nord - Moyen Orient et Turquie, Russie et CIS, Afrique Sub-Saharienne, Chine, ASEAN [1].

Le conglomérat est un réseau de plus de 120 000 employés qui opèrent dans neuf (9) domaines majeurs d'activités : GE Aviation, GE Oil & Gas, GE Healthcare, GE Capital, GE Renewable Energy, GE Appliances & Lighting, GE Energy Connection, GE Transportation et enfin GE Power.

#### I.1.2. Historique

Général Electric Company, leader dans le secteur de l'énergie, est une multinationale fondée par le savant « Thomas Alva Edison » en 1890, à l'issue de la fusion de ses différents business d'antan. Parmi ces derniers figurent notamment l'Edison Light Electric Company, spécialisée dans la fabrication des lampes à incandescence et autres appareils électriques, ainsi que l'Edison Electric Illuminating Company dont l'activité principale consistait en la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique, grâce à la construction de sa première centrale de production d'électricité [1] [2].

Durant cette période, Thomson-Houston Company représentait un sérieux concurrent dans le domaine de l'innovation électrique. Néanmoins, l'évolution des deux compétiteurs était telle que l'expansion de leurs business respectifs devenait de plus en plus compliquée. Ceci étant dû à la complémentarité de leurs technologies et l'incapacité de produire des installations électriques complètes individuellement. La collaboration s'est ainsi imposée, et l'année 1892 fut marquée par la fusion des deux entités donnant naissance à « General Electric Company » [1] [2].

Depuis sa création, General Electric n'a cessé de se développer pour devenir l'un des acteurs les plus importants dans plusieurs domaines d'activités. Son histoire a été marquée par plusieurs événements, parmi lesquels ceux cités ci-dessous :

- 1895 : Première mise en marche de trains électriques en remplacement des trains à vapeur.
- 1903 : Installation de la plus grande turbine à vapeur 5000 KWH mono-arbre.

- 1929 : Mise en place de la plus importante unité de production d'électricité à Hammond.
- 1942 : Basé sur un design de Sir Frank Whittle, le moteur I-A lance effectivement l'Amérique dans l'âge du moteur à réaction. Propulsé par deux turboréacteurs GE I-A, le Bell XP-59 Airacomet devient le premier avion à réaction américain réussi en 1942.
- 1949 : La première turbine à gaz pour production d'électricité est expédiée à Oklahoma Gas & Electric.
- 1957 : GE développe le J93, le premier moteur à fonctionner à trois fois la vitesse du son, alimentant le bombardier expérimental de l'USAF XB-70.
- 1999 : General Electric rachète à ALSTOM son département Turbines à Gaz qui travaillait jusque-là sous licence GE.
- 2013 : Rachat de Lufkin Industries, entreprise spécialisée dans les transmissions et le pompage pour l'industrie pétrolière et gazière.
- 2015 : Intégration totale de l'entreprise ALSTOM.
- 2016 : GE cède un de ses business (GE water) pour le compte de Suez [1] [2].

### **I.1.3. GE en Algérie**

Les entreprises du conglomérat sont composées de plusieurs divisions, selon une structure matricielle.

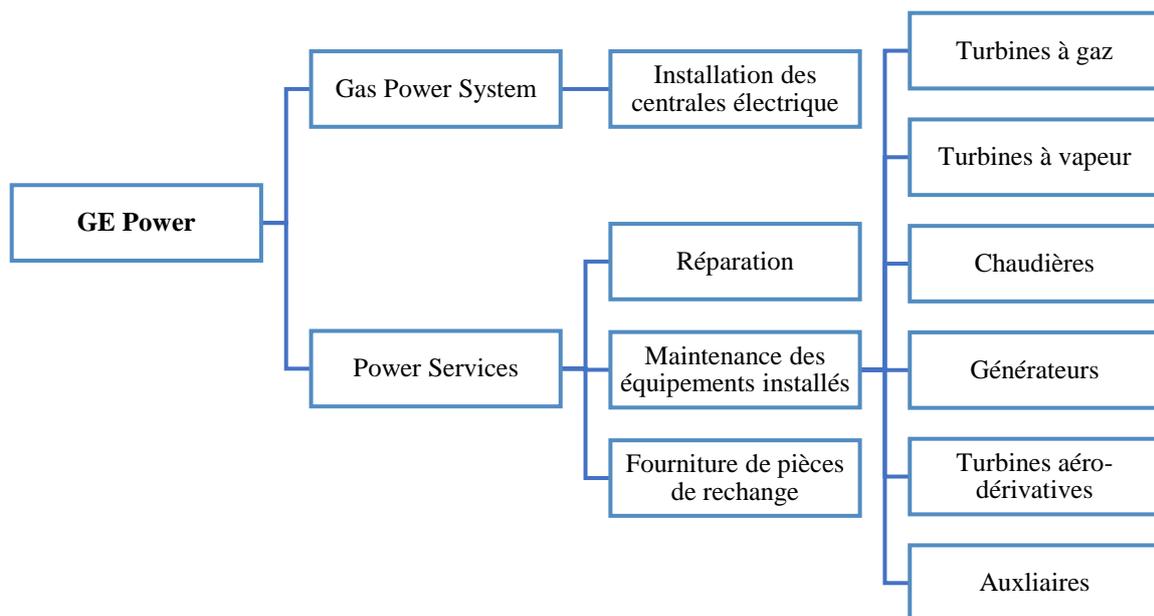
Ci-dessous sont citées les différentes filiales de GE ainsi que leurs partenaires et clients, les types de services et aussi les produits offerts.

- *GE Power* : fournit des produits et des services liés à la production d'énergie, aux industries, gouvernements et autres consommateurs dans le monde entier.
- *GE Renewable Energy* : propose des solutions d'exploitation des énergies renouvelables éoliennes et hydroélectrique...
- *GE Oil & Gas* : dessert tous les secteurs de l'industrie du pétrole et du gaz, depuis le forage, l'achèvement et la production du pétrole aux transports et aux pipelines.
- *GE Aviation* : conçoit et produit des moteurs d'avions civils et militaires, composants numériques intégrés...
- *GE Health Care* : fournit des technologies de soin de santé essentiellement : l'imagerie médicale, les solutions numériques de suivis et diagnostics des patients... Pour les établissements hospitaliers, le marché de la recherche, ainsi que les boîtes pharmaceutiques et biotechnologiques.

- *GE Transportation* : considéré comme chef de file mondial en matière de fourniture de technologies pour l'industrie minière, ferroviaire, marine, stationnaire et de forage.
- *GE Energy Connections and Lighting* : assure la conversion, l'automatisation et l'optimisation de l'énergie en vue d'une alimentation électrique grand public.
- *GE Capital* : fournit des produits et des services financiers pour les clients et les marchés alignés avec les entreprises industrielles de GE [1].

Le groupe GE est présent depuis 40 ans en Algérie à travers cinq (5) business. En effet, il mène ses activités en partenariat ou sous contrats avec les sociétés algériennes dans les différentes branches d'activités, en l'occurrence : GE Health Care, GE Aviation, GE Oil & Gas, GE Transportation, et GE Power. Ce dernier se divise en deux sous business : Power Gas Systems (PGS) chargé de l'installation des centrales électriques, et Power Services (PS) dont la mission principale est la prise en charge des contrats de maintenance des équipements installés.

La figure suivante illustre la structure générale du business GE Power.



**Figure I.1 : Structure du business GE Power**

Le présent travail a été effectué dans le cadre des projets et études de GE power services.

## I.2. GE Power Services Algérie

### I.2.1. Activité

#### I.2.1.1. Les Produits de GE Power

GE power fournit principalement des turbines de différents types, à savoir :

- **Les Turbines à Gaz** : Machine tournante thermodynamique qui appartient à la famille des moteurs à combustion interne, son rôle est de convertir l'énergie contenue dans un hydrocarbure en énergie mécanique. Elle fonctionne selon le cycle de Brayton, qui comprend une phase de compression, une phase de chauffage (combustion) et une phase de détente. On distingue cinq parties principales dans une turbine à gaz :
  - L'admission d'air ;
  - Le compresseur ;
  - Les chambres de combustion ;
  - La turbine ;
  - L'échappement.

GE offre une gamme de turbines à gaz dont la capacité varie de 40 à 390 Mégawatts [1] [3].

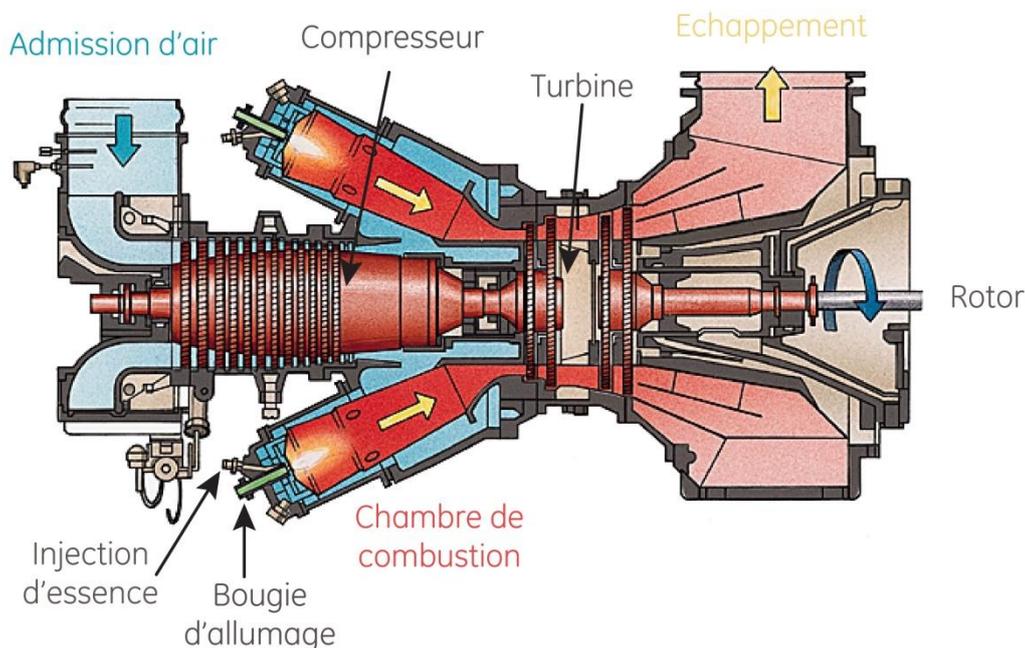
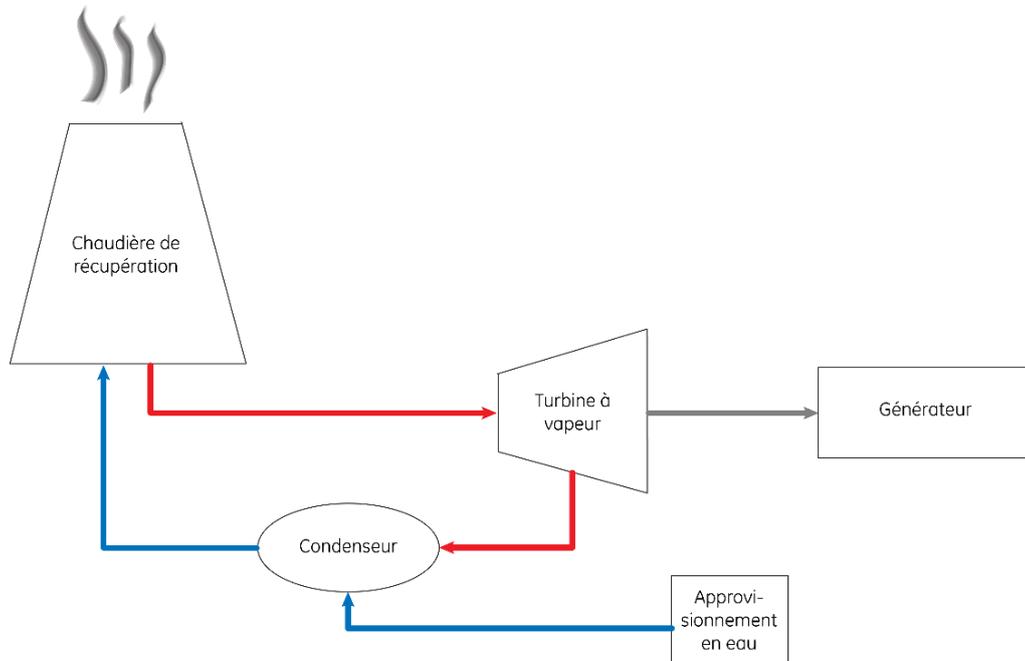


Figure I.2 : Composition d'une turbine à gaz

- **Les Turbines à Vapeur** : Des dispositifs rotatifs destinés à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide liquide (eau) ou gaz (vapeur, air, gaz de combustion) pour faire

tourner un arbre solidaire à des pales de la turbine. Une turbine à vapeur comprend deux étages assurant chacun une ou deux fonctions :

- La détente de la vapeur qui correspond à la conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique.
- La conversion de l'énergie cinétique en couple de rotation de la machine par le biais des aubages mobiles [1] [3].



**Figure I.3 : Composition d'une turbine à vapeur**

- **Les Turbines Aéro-dérivatives** : Un moteur d'avion dont la fiabilité a diminué est recyclé en générateur d'électricité et ce en étant couplé à un alternateur. Ces turbines sont considérées comme étant les meilleures en termes de rendement comparées à leurs paires avec un intervalle allant de 38% à 45%. Leur principe de fonctionnement est le même que celui d'une turbine à gaz avec des spécificités plus avantageuses [2] [3].

### **I.2.1.2. Les Types d'Inspections de Maintenance**

La disponibilité des équipements et les coûts de la maintenance représentent deux des préoccupations les plus importantes pour un propriétaire d'une turbine à gaz industrielle. Il faut donc concevoir un programme de maintenance efficace prenant en compte la relation entre les plans d'exploitation, les priorités de l'installation, le niveau de compétence du personnel d'exploitation et d'entretien, toutes les recommandations du fabricant de l'équipement concernant le nombre et les types d'inspections, la planification des pièces de rechange et d'autres facteurs importants affectant la vie des composants et le bon fonctionnement de la centrale [1] [4].

Les inspections d'entretien peuvent se subdiviser en grandes catégories : de veille, d'exploitation, et de démontage.

❖ **Inspection de veille**

Les inspections de veille sont effectuées au cours des périodes hors pointe durant lesquelles la machine est à l'arrêt. Elles incluent l'entretien courant des systèmes accessoires ainsi que l'étalonnage des dispositifs (installation de batterie, changement des filtres, la vérification des niveaux d'huile et d'eau...) [1] [4].

❖ **Inspection d'exploitation**

L'inspection d'exploitation se fait en observant des paramètres d'exploitation importants pendant le fonctionnement de la turbine. Elles commencent par l'établissement des données d'exploitation de base pendant le démarrage initial d'un nouveau bloc de production et après toute intervention majeure de démontage permettant, par la suite, de mesurer sa détérioration ultérieure [1] [4].

❖ **Inspection de démontage**

L'inspection de démontage implique l'ouverture de la turbine pour inspecter les composants internes, exécutée sur des degrés différents, à savoir :

– Inspection de combustion

Est une inspection à l'arrêt relativement courte qui consiste à remplacer les tubes de flamme, les pièces de transition, les injecteurs de combustible et les couvercles d'extrémité. L'inspection, l'entretien et les réparations appropriés de ces éléments contribueront à prolonger la durée de vie des parties en aval, telles que les directrices et les aubes [1] [4].

– Inspection de la veine gazeuse

Son but est d'examiner les pièces exposées aux températures élevées des gaz chauds dégagés par le processus de combustion. Elle comporte l'ensemble de l'inspection de combustion ainsi qu'une inspection détaillée des directrices de la turbine, des protections du stator et des aubes de la turbine [1] [4].

– Inspection majeure

Elle consiste à examiner tous les composants internes rotatifs et fixes de l'admission de la machine jusqu'à l'échappement. Cette inspection inclut des éléments précédents issus des inspections de combustion et de la veine gazeuse, en plus de l'ouverture complète du compresseur [1] [4].

La figure ci-dessous illustre l'emplacement des différentes inspections de démontage.

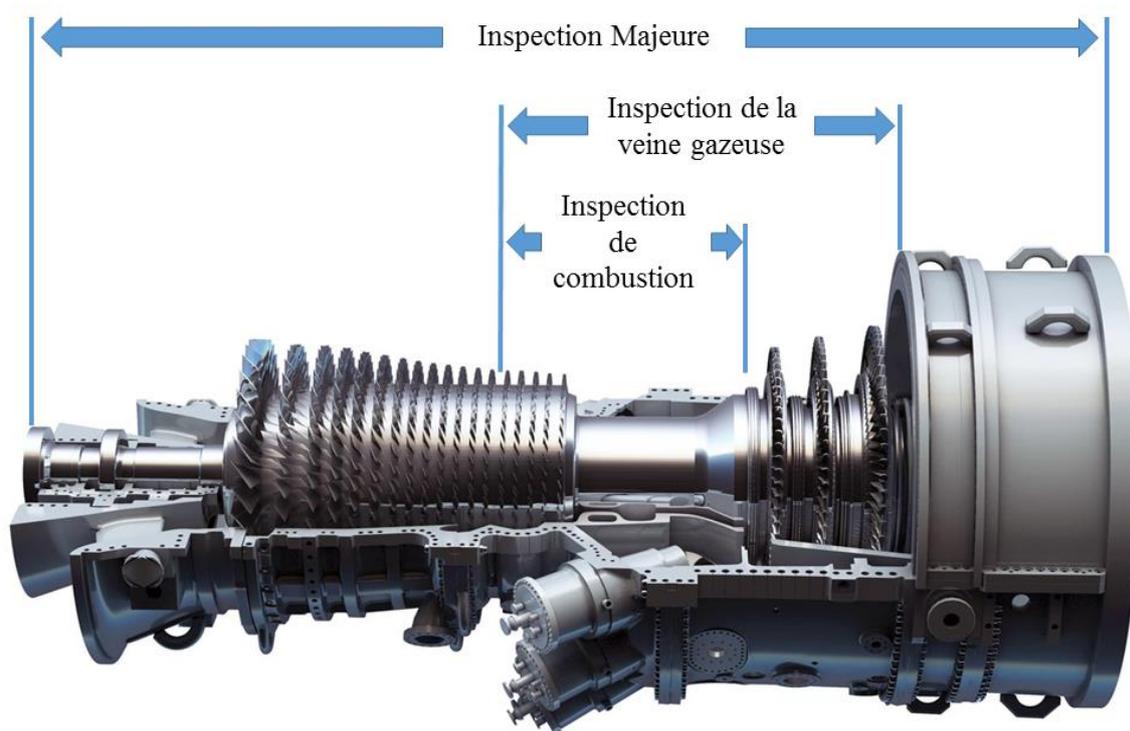


Figure I.4 : Les degrés d'une inspection de démontage

### I.2.2. Les réalisations en Algérie

Général Electric est présente de par ses divers contrats dans plusieurs stations de production d'électricité dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivante [5].

Tableau I.1 : Caractéristiques des centrales en Algérie

Le site	Date de mise en marche	Type de turbine (classe)	Nombre d'unité par site	Capacité (MW)	Type de contrat
Adrar	1992-1993	5	4	25	MMP
Alger Port	2009	6B	2	36	O&M /MMP
Annaba	2009	6B	2	36	O&M /MMP
Bab Ezzouar	1978	GT10	4	30	TX
Bellara	2019	9FA	4		TX

<b>Boufarik Fast track</b>	2017	9FA	3	237	TX
<b>Boutlelis</b>	2019	9FA	2	225	TX
<b>Djelfa</b>	2019	9FA	4	216	TX
<b>Fkirina</b>	2004	GT13	2	166	TX
<b>Hadjret Ennous (Cherchell)</b>	2009	9FB	3	269	CSA
<b>Haoud El Hamra</b>	1960	GT10	2	5	TX
<b>Hassi Berkine</b>	2000-2002	9E	3	123	MMP
<b>Hassi Messaoud Nord</b>	1978	GT9	5	25	TX
<b>Hassi Messaoud Nord</b>	1988-2000	9E	5	123	MMP
<b>Hassi Rmel</b>	2019	9FA	2	187	TX
<b>Hassi RMel Fast track</b>	2017	9FA	3	206	TX
<b>In Salah</b>	1983	5	4	23	MMP
<b>Kahrama Desalination (Arzew)</b>	2005-2006	9E	3	123	MMP
<b>Kais (Khenchela)</b>	2019	9FA	4	206	TX
<b>Koudiet Draouch (El Taref)</b>	2013	9FB	3	269	CSA
<b>Marsat El Hadjadj</b>	1982	5	8	23	MMP
<b>Mostaganem</b>	2020	9FA	4	227	TX
<b>Msila</b>	1989-1993	9E	3	110	MMP
<b>Naama</b>	2019	9FA	4	189	TX
<b>Oran-Est</b>	2008	6B	2	36	TX
<b>Oumache (Biskra)</b>	2018	9FA	4	216	TX
<b>Relizane</b>	2009	GT13	3	174	TX
<b>Skikda</b>	2005	9FA	2	252	CSA
<b>Terga (Oran)</b>	2011-2012	GT26	3	276	CSA
<b>Tiaret</b>	1988	9E	3	109	MMP

---

## **CHAPITRE II : STATION DE HADJRET ENOUSS**

---

## Chapitre II : Station de Hadjret Enouss

### II.1. Introduction

La station de Hadjret Enouss représente l'une des réalisations de General Electric en Algérie. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressées au disfonctionnement des accumulateurs à vessie du système d'alimentation hydraulique de cette station.

Ce chapitre présente brièvement la station ainsi que les éléments qui la constituent.

### II.2. Localisation et présentation générale

Shariket Kahraba Hadjret Enouss SpA ((SKH) SpA) résulte d'un partenariat entre cinq (5) entités indépendantes, dans le cadre de la nouvelle loi algérienne sur l'électricité et la distribution publique de gaz par canalisations. Elle est détenue à :

- 26 % SNC,
  - 25 % Mubadala Development Company,
  - 17,15 % Sonelgaz,
  - 17,15 % Sonatrach,
  - 14,70 % Algerian Energy Company (AEC).
- } Société Algerian Utilities  
International Limited

Les travaux de construction de la station ont débuté en Juin 2006 et ont pris fin en 2008 avec une mise en opération de la première tranche de la centrale en Aout de la même année. La centrale a une puissance nette d'environ 1 200 MW (garanti à 30°C - combustible gaz naturel) où 840 MW (Combustible gasoil comme combustible de secours) [6].

Celle-ci est située dans la Wilaya de Tipaza à une distance d'environ 60 km à l'ouest d'Alger et environ 12 km à l'ouest de Cherchell. Elle est limitée au sud par la route nationale numéro 11, à l'ouest par une piste, à l'est par l'Oued Arbal et au nord par la mer Méditerranée [7].



Figure II.1 : Localisation de la station de Hadjret Enouss

Le site possède une superficie d'environ 35 hectares, occupée par plusieurs bâtiments dont trois principaux, abritant chacun un train turboalternateur, auquel est jointe une chaudière de récupération. Les autres bâtiments de la centrale contiennent des unités pour le traitement de l'eau, un poste de départ, des bureaux pour l'administration et la salle de contrôle, les équipements d'entretien et les entrepôts [6].

### II.3. Description de la centrale

La centrale est conçue pour être exploitée toute l'année en charge de base pour répondre à la demande d'énergie vers un général interconnecté. Sur une base annuelle, la centrale génère au maximum environ 10 TWh, ce qui correspond à une disponibilité de 94 % ou à 8 234 heures de fonctionnement par année [6].

#### II.3.1. Principe de fonctionnement

Les centrales à cycles combinés sont reconnues pour produire le rendement net le plus élevé. Il est obtenu en récupérant la chaleur des gaz d'échappement de la turbine à gaz (ou turbine à combustion) au travers des chaudières de récupération afin de produire de la vapeur haute pression, laquelle entraîne une turbine à vapeur. Les gaz d'échappement ainsi refroidis sont finalement évacués dans l'atmosphère par des cheminées. La vapeur haute pression détendue dans la turbine à vapeur est par la suite condensée par circulation d'eau froide dans un condenseur. Le condensat est retourné à la chaudière de récupération pour y être revaporisé, bouclant ainsi le cycle vapeur [8].

La figure (II.2) ci-dessous illustre le principe de fonctionnement d'un cycle combiné de l'admission d'air jusqu'à l'échappement vers l'atmosphère.

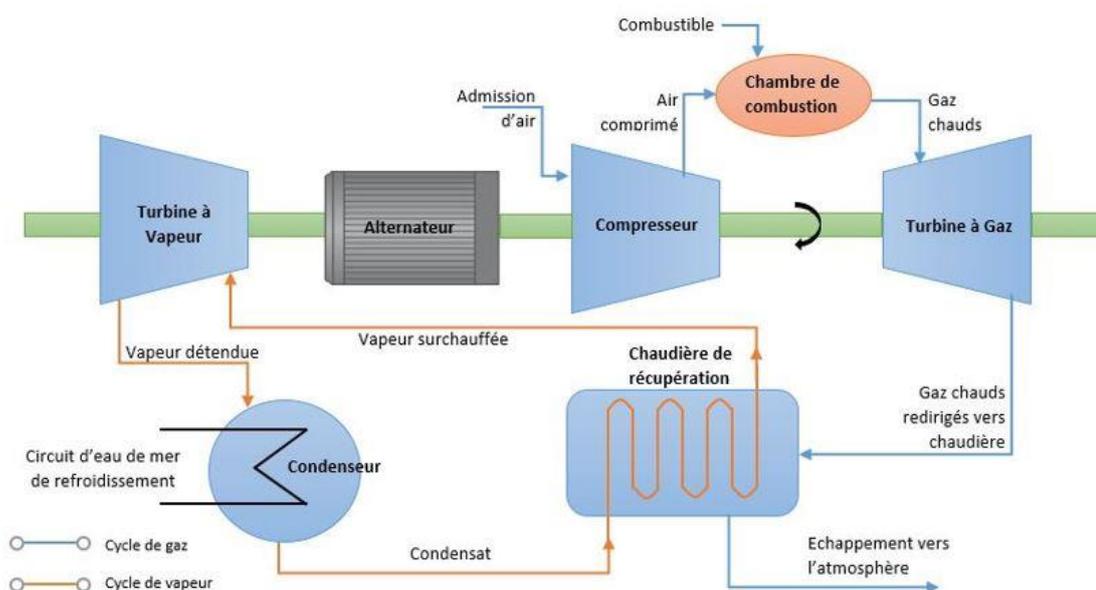


Figure II.2 : Schématisation du cycle combiné

L'exploitation de la centrale nécessite approximativement  $2.10^9$  m<sup>3</sup> de gaz naturel (combustible principal) par année livré au site par l'intermédiaire d'une conduite de gaz haute pression installée par Sonelgaz. Cette conduite, passe par une station de gaz naturel (poste de comptage) localisée à proximité d'Oued Arbal. Un poste de détente et une station de mesure installés sur le site de la centrale assurent l'ajustement définitif de la pression d'alimentation du gaz naturel (31-36 bars(g) à l'entrée de la turbine à gaz) [6].

### II.3.2. Configuration et équipements

La configuration générale de la centrale est à arbre unique, et elle est pourvue des principales composantes suivantes :

- Turbines à gaz et alternateur ;
- Chaudières de récupération ;
- Turbines à vapeur ;
- Station de pompage / condenseur / système de refroidissement ;
- Transformateurs élévateurs et poste de départ ;
- Equipements connexes.

Dans une configuration à arbre unique, la turbine à gaz et la turbine à vapeur sont assemblées sur un arbre commun et par conséquent, les deux turbines entraînent un seul alternateur [8].

Les caractéristiques de la centrale à cycle combiné de Hadjret Enouss sont résumées dans le tableau suivant.

**Tableau II.1 : Sommaire des caractéristiques de la centrale**

<b>Caractéristiques</b>	
<b>Type de configuration</b>	Arbre unique
<b>Modèle de turbine</b>	PG9371FB
<b>Puissance brute générée par les turbines à gaz <sup>(1)</sup> (MW)</b>	3 x 425
<b>Puissance brute générée par les turbines à vapeur (MW)</b>	
<b>Puissance brute totale générée <sup>(1)</sup> (MW)</b>	1275
<b>Puissance totale nette (MW) (garantie à 30°C)</b>	1227
<b>Consommation de gaz naturel par turbine (t/h)</b>	57,24

<b>Consommation de gaz naturel par bruleurs d'appoint (t/h)</b>	7,0
<b>Vapeur générée par les chaudières de récupération (t/h)</b>	3 x 381
<b>Débit d'eau de circulation (m<sup>3</sup>/h)</b>	84000
<b>Equipement intérieur :</b>	
– Turbines à combustion	3
– Turbine à vapeur	3
– Alternateurs	3
– Condenseur	3
<b>Autres équipements intérieurs :</b>	
– Systèmes auxiliaires	Oui
– Unité de déminéralisation d'eau	Oui
<b>Equipement extérieur :</b>	
– Unité de dessalement de l'eau de mer	2
– Cheminées	3
– Transformateurs	3
– Poste de départ	3
– Chaudières de récupération	3

<sup>(1)</sup> Puissance brute pour des conditions d'exploitation en base au gaz naturel, a une température ambiante de 30°C

### II.3.2.1. Turbine à gaz

Les modèles de turbines à gaz installées sont dotées d'un système de combustion étagé avec prémélange du combustible avec l'air, ainsi que d'un système de suivi des dynamiques de combustion.

Elles sont reliées à un alternateur à excitation statique refroidi à l'hydrogène (capacité nominale 330 MVA, fréquence 50Hz, tension de sortie 15,75-17,5 kV). L'admission d'air des turbines est dotée de plusieurs étages de filtration et d'un système de refroidissement d'air [6] [8].

### II.3.2.2. Chaudière de récupération

Les trois turbines à gaz de la centrale sont chacune équipées d'une chaudière de récupération de chaleur (HRSG — Heat Recovery Steam Generator) avec ballons et surchauffeurs, incluant des brûleurs d'appoint. La chaudière de récupération, installée à l'extérieur du bâtiment principal, produit de la vapeur à trois niveaux de pression différents (basse, moyenne, haute), ce qui permet une récupération très poussée de l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement en limitant au maximum les pertes d'énergie à la cheminée [6] [8].

Le tableau ci-dessous regroupe l'ensemble des caractéristiques de la vapeur produite par chaque étage de pression.

**Tableau II.2 : Caractéristiques de la vapeur basse, moyenne et haute pression**

	Paramètres	Unités	PG9371FB
			Gaz naturel
<b>Haute pression</b>	Pression	Bar	124
	Température	°C	565
	Débit	t/h	465
<b>Moyenne pression</b>	Pression	Bar	34
	Température	°C	565
	Débit	t/h	10
<b>Basse pression</b>	Pression	Bar	4
	Température	°C	302
	Débit	t/h	7

### II.3.2.3. Turbine à vapeur

Les turbines à vapeur sont de type « à condensation avec resurchauffe ». La vapeur haute pression produite dans les chaudières de récupération est injectée dans les turbines où elle est détendue [6] [8].

### II.3.2.4. Condenseur

Chaque turbine à vapeur est munie d'un condenseur à faisceau tubulaire dans lequel la vapeur saturée, provenant de la turbine, se condense via un échange de chaleur avec l'eau de mer. L'alimentation en eau de circulation est assurée par la station de pompage reliée à la mer par un canal ouvert. L'eau ayant circulé dans le condenseur est rejetée en totalité dans la mer par

trois (3) émissaires. Le condensat, qui circule en circuit fermé, est retourné aux chaudières de récupération afin d'y être de nouveau évaporé, pressurisé et surchauffé aux conditions requises par la turbine à vapeur [6] [8].

### **II.3.2.5. Transformateurs et poste de départ**

Afin d'élever la tension de livraison à 400 kV, un poste de départ est installé dans un bâtiment situé au sud des trois bâtiments abritant les turbines. Ce poste comprend principalement trois (3) transformateurs élévateurs de tension et différents appareils de commande.

Chacun de ces transformateurs contient environ 60 000 L d'huile de refroidissement et est installé au-dessus d'une cuvette de rétention munie d'un lit coupe-feu fait de pierre concassée, afin de contenir tout déversement accidentel [6].

### **II.3.2.6. Equipements connexes**

En plus des équipements cités précédemment (turbine à gaz, turbine à vapeur, chaudière, etc.), il existe plusieurs systèmes tout aussi nécessaires au bon fonctionnement de la centrale.

- Système d'approvisionnement en eau

L'approvisionnement en eau nécessaire à la centrale se fait à partir d'un canal ouvert qui conduit l'eau de mer vers une station de pompage. En amont de la station de pompage, un grillage métallique amovible sert à minimiser l'introduction des débris de grandes dimensions, le reste est bloqué par des dégrilleurs et des tamis rotatifs. Les pompes verticales de circulation d'eau (pour le condenseur) et les pompes de refroidissement auxiliaires y sont installées [6].

La majeure partie de l'eau de mer, est utilisée directement dans le procédé, sans être dessalée, comme eau de circulation pour le condenseur (utilisation principale) et pour le refroidissement des systèmes auxiliaires. L'autre partie passe dans le système de dessalement avant d'être utilisée dans le procédé comme [6] :

- Eau d'appoint pour les chaudières de récupération (après traitement de déminéralisation) ;
  - Eau de service (nettoyage des équipements, planchers, etc.) ;
  - Eau de protection incendie ;
  - Eau potable.
- Procédé de déminéralisation de l'eau

L'eau d'appoint des chaudières de récupération est déminéralisée afin d'éviter l'entartrage des tubes des échangeurs de chaleur. L'unité de déminéralisation possède deux (2) chaînes de traitement installées en parallèle qui fonctionnent en alternance afin d'assurer une production

continue d'eau déminéralisée pendant la régénération des lits résiniques. Deux (2) réservoirs hors terre d'eau déminéralisée de 600 m<sup>3</sup> permettent d'absorber les pointes de demande [6] [8].

- Système de traitement des purges des chaudières

Les purges des chaudières sont dirigées vers un réservoir pour y être mélangée avec les autres eaux usées, avant d'être neutralisées pour obtenir un pH entre 6,0 et 8,5 et rejetées dans l'émissaire. Un coagulant est ajouté pour améliorer l'efficacité de la décantation et réduire son contenu en matières en suspension [6].

- Génératrices de secours

La centrale est équipée d'un ensemble de neuf génératrices alimentées au diesel, ayant chacune une capacité d'environ 2,0 MW, qui permettent d'alimenter les composantes critiques de la centrale dans l'éventualité d'un arrêt d'urgence ainsi que pour le redémarrage de la centrale [6].

- Stockage de l'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène est réalisé dans des cylindres d'une capacité individuelle de 50 L (229 mm de diamètre et environ 1500 mm de longueur). Chaque cylindre peut contenir environ 9,1 Nm<sup>3</sup> d'hydrogène 200 bars(g), soit l'équivalent d'environ 0,75 kg d'hydrogène [6].

- Système hydraulique de commande

La centrale possède un système hydraulique permettant l'ouverture et la fermeture des divers orifices et valves de commande. Leur mouvement, total ou partiel, dépend de la quantité de fluide pénétrant les valves. De plus, un système de régulation de pression y est installé afin de garantir un certain équilibre de la pression du fluide, particulièrement dans le cas de l'arrêt de la turbine, appelé : accumulateur hydraulique.

#### **II.4. Diagnostic et problématique**

Le système hydraulique de commande de Hadjret Enous permet entre autre de réguler la pression traversant le circuit et ce, en maintenant un équilibre de pression à travers la mise en marche des accumulateurs.

Ces derniers interviennent lorsque la pompe est mise en marche et qu'elle n'arrive pas à fournir la pression adéquate, le pressostat indique cette défaillance en envoyant un signal qui se charge de leur déclenchement.

Suite au dysfonctionnement des accumulateurs en 2016, la station a connu un arrêt brusque de l'unité de production numéro 2. Cet arrêt est principalement dû à une contamination de l'huile hydraulique par l'Azote, ce qui a endommagé certains équipements du circuit, à savoir : les servovalves, les vannes de commande, les filtres...

Le rapport d'investigation fait constat d'un éclatement de la vessie contenue dans un des accumulateurs. Par ailleurs, une anomalie avait déjà été signalée auparavant. Effectivement, la fuite qu'a rencontrée un autre accumulateur avait déjà affaibli l'efficacité de ce système. Néanmoins, les ingénieurs d'installation avaient démontré que deux (2) accumulateurs suffisaient amplement au maintien de la pression recommandée. Or, la détérioration d'un accumulateur et l'explosion de l'autre ont provoqué l'arrêt subite de la machine.

En vue de la compréhension des causes du problème rencontré, les ingénieurs ont émis des hypothèses parmi lesquelles : la dégradation de la qualité de l'huile.

Par ailleurs, d'autres hypothèses sont à prendre en considération, entre autre une hausse de pression pouvant affecter le système et par conséquent la vessie, ou encore la qualité du matériau de la vessie elle-même.

Le présent travail portera sur la détermination des raisons de la défektivité des vessies à travers l'établissement de différentes simulations à l'aide d'outils tels que SolidWorks et COMSOL, qui permettront d'étudier l'écoulement au sein de l'accumulateur ainsi que l'impact de la pression sur la vessie.

---

# **CHAPITRE III : DESCRIPTION DU SYSTEME HYDRAULIQUE**

---

## **Chapitre III : Description du système hydraulique**

### **III.1. Introduction**

Les circuits hydrauliques se retrouvent dans toutes les installations industrielles qui requièrent de la force, de la flexibilité et de la fiabilité. Avec l'avènement de l'électronique et de l'informatique, ces circuits ont connu des améliorations importantes, tel que désormais plusieurs systèmes ont été mis en place afin d'assurer le bon fonctionnement mais aussi la protection du circuit globale ainsi que ses composants.

Ces circuits, appelés « circuits de transmission de puissance » ou encore « circuits hydrauliques industrielles », ont des caractéristiques permettant une large utilisation industrielle, à savoir : une pression importante issue de la résistance de l'huile à l'écoulement, et un débit moyen ou faible généré par une pompe.

### **III.2. Généralités**

Le système d'alimentation hydraulique fournit le fluide hydraulique essentiel au bon fonctionnement des équipements de commande de la turbine à gaz. Ce fluide assure l'ouverture et la fermeture de la soupape d'arrêt du combustible alimentant la turbine, il contrôle également le mouvement des aubes directrices de la turbine ainsi que le déclenchement des appareils responsables de la protection de la turbine [15].

### **III.3. Principe de fonctionnement**

L'huile lubrifiante filtrée et régulée provenant du collecteur des paliers de la turbine à gaz est utilisée comme fluide de haute pression nécessaire pour répondre aux besoins du système hydraulique. Une pompe à piston, entraînée par un arbre de transmission des auxiliaires, est la pompe principale de cette huile à haute pression avec une pompe à palettes entraînée par un moteur fournit la réserve auxiliaire nécessaire [15].

L'huile hydraulique, mise sous pression par la pompe principale, est contrôlée par un compensateur de pression incorporé dans la pompe. L'action du compensateur varie en fonction du rendement de la pompe aidant à maintenir une pression de consigne sur son refoulement.

La pompe auxiliaire démarre au moment de la mise en marche de la turbine, contrairement à la pompe principale qui n'atteint même pas sa vitesse nominale. La pompe auxiliaire continue à tourner jusqu'à ce que le capteur de vitesse indique que la vitesse minimale de contrôle a été dépassée [15].

Quand la pompe principale est mise en marche et qu'elle n'arrive pas à fournir la pression adéquate, le pressostat intervient en indiquant cette défaillance, il envoie par la suite un signal

qui se charge du déclenchement de la pompe auxiliaire. Le système est généralement équipé d'un deuxième pressostat pour une éventuelle défaillance au niveau du premier.

Le fluide hydraulique est pompé vers le collecteur, un ensemble conçu pour fournir des moyens d'interconnexion de plusieurs petits composants. La sortie des deux pompes principale et auxiliaire est reliée au raccord d'entrée réceptif du collecteur hydraulique. L'ensemble comprend deux soupapes de surpression contrôlant la pression de sortie de la pompe auxiliaire alors que l'autre protège le circuit de la pompe hydraulique principale d'une détérioration en cas de panne du compensateur de pression de la pompe principale [15].

Chaque circuit de pompe comprend une soupape de retenue, en aval de la soupape de surpression qui maintient les lignes hydrauliques pleines quand la turbine est arrêtée. Les soupapes purgent tout l'air présent dans la tuyauterie de refoulement des pompes.

A partir d'une simple connexion de sortie du collecteur, le fluide à haute pression est conduit à travers le ou les filtres du système et devient alors un fluide de commande à haute pression, une protection primaire est intercalée entre le système de protection et de commande de la turbine et les composants de la turbine qui alimentent ou coupent le combustible.

Un accumulateur hydraulique est également relié dans la ligne haute pression du système d'alimentation hydraulique pour absorber tous les chocs importants susceptibles de se produire lors du démarrage des pompes d'alimentation [15].

Le flux d'huile lubrifiante pour les pompes est prélevé sur le collecteur des paliers de la turbine après avoir été filtrée. Le filtre du système d'alimentation hydraulique installé dans la tuyauterie de sortie du collecteur d'alimentation hydraulique est nécessaire pour éviter que des contaminants et autres particules engendrés par l'usure des pompes ne pénètrent dans les dispositifs de déclenchements du système de protection de la turbine.

Des indicateurs de pression différentielle sont prévus au niveau de la tuyauterie de chaque filtre pour fournir une indication de pression de l'huile de part et d'autre du filtre [15].

## **III.4. Description**

### **III.4.1. Circuit hydraulique**

Les circuits hydrauliques ont en général tous la même structure. Ils se composent souvent de trois (3) zones :

- *Zone 1* : Source d'énergie (Centrale Hydraulique) ;
- *Zone 2* : Actionneurs (ou récepteur hydraulique) transformant l'énergie hydraulique en énergie mécanique afin de l'utiliser dans des tâches précises ;
- *Zone 3* : Eléments reliant les deux zones précédentes, composés : d'éléments de distribution et de liaison, d'appareils de mesure, de protection et de régulation.

Ces circuits sont connus pour offrir une fiabilité et une durée de vie assez considérables ainsi qu'une transmission d'importantes puissances. Néanmoins, ils représentent un fort investissement.

Dans ce chapitre, on détaillera les caractéristiques du circuit étudié ainsi que ses composants en vue de la réalisation d'un schéma simplifié de l'installation [9] [10].

### **III.4.2. Types de circuit**

Dans les systèmes hydrauliques, il existe deux (2) types de circuits : ouvert et fermé.

#### **III.4.2.1. Circuit ouvert**

Est un circuit dans lequel le réservoir représente un point de départ et de retour du fluide en même temps. Dans ce type de circuit, l'huile est puisée par la pompe, fonctionnant à la pression atmosphérique, pour ensuite être drainée et dirigée sous pression vers des conduites de distribution qui l'enverront vers l'élément de réception. Suite à cela, l'huile est renvoyée vers le réservoir dépourvue de pression [9] [11].

#### **III.4.2.2. Circuit fermé**

Dans ce type de circuit le fluide opère sous pression peu importe la puissance de la pompe utilisée. La différence entre ce type de circuit et le type précédent réside dans l'installation des soupapes de sélection, qui contrairement au cas précédent, sont installées en parallèles. Afin de réaliser ce circuit, la pompe aspire le fluide à une pression plus importante que celle de l'atmosphère (dite pression de gavage). Malheureusement, des fuites internes existeront en permanence dans ce type de circuit, par conséquent une pompe annexe (pompe de gavage) devra être installée afin de les combler, ce qui rend ce circuit plus délicat à concevoir.

Dans le cas étudié, le système est ouvert, et ce en vue d'une maintenance de l'élément principal du projet. Ainsi, le fluide (l'huile) est conduit vers le réservoir de départ au lieu de la pompe [9] [11].

### **III.5. Constituant du système hydraulique**

Dans cette partie, les trois (3) zones constituant le système hydraulique seront détaillées en donnant la composition et la définition de chaque zone de notre cas d'étude.

#### **III.5.1. Zone 1**

Centrale hydraulique : Appelée aussi « Groupe hydraulique », est un générateur de débit composé principalement d'un réservoir d'huile, un moteur et une pompe [10].

- Réservoir d'huile : A pour fonction principale le stockage de l'huile suffisant pour le système et l'alimentation de la pompe, ainsi que son refroidissement et sa décantation.

Le réservoir fournit non seulement les besoins d'exploitation du système, mais il réapprovisionne également le fluide perdu par présence de fuites par exemple. En outre, le réservoir sert aussi de bassin de débordement pour l'excès d'huile expulsée du système par une expansion thermique (augmentation du volume de fluide provoquée par les changements de température), les accumulateurs et le déplacement du piston et de la tige [10] [11].

Dans le cas du système étudié, le réservoir possède un volume de 1535 L avec 157,4 cm de longueur, 121,9 cm de largeur et une hauteur de 80 cm. Il est rempli à 67,5 % de son volume total.

- Moteur : Sert à entraîner l'arbre de la pompe en rotation. Pour les installations fixes, il est électrique, et est thermique pour les installations mobiles [10].

Dans le cas de notre système, le moteur est électrique avec 575 volts de puissance de mise en marche.

- Pompe : Est de type volumétrique à cylindre variable, dont le rôle est de transformer l'énergie mécanique fournie par le moteur en puissance hydraulique qui, par la suite, est transformée et utilisée par l'actionneur.

L'huile aspirée du réservoir est refoulée sous pression dans les éléments reliant les différentes composantes du système [10].

Les pompes peuvent être subdivisées en deux (2) grandes familles :

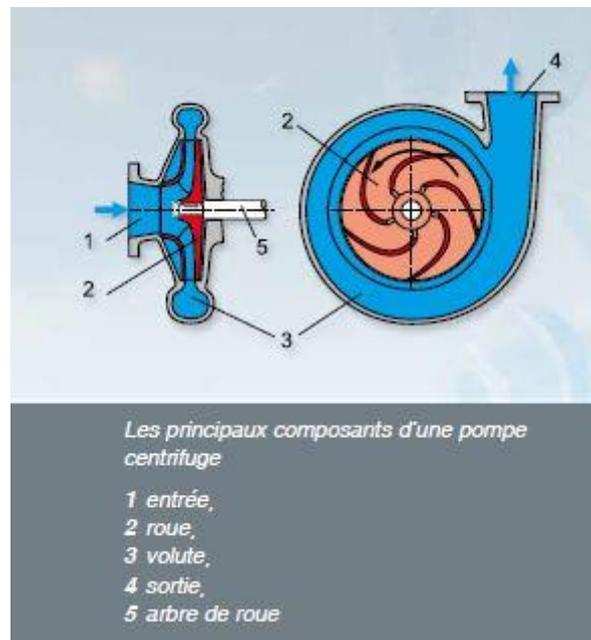
- Les pompes volumétriques (hydrodynamiques) : dans ce type de pompe, les chambres d'admission et de refoulements (où le fluide est expulsé) sont séparées par des pièces mécaniques rigides, ce qui assure l'étanchéité entre ces deux chambres [13]. Elles se composent d'un élément fixe (Stator) dans lequel un ou plusieurs composantes mobiles participent, par leur déplacement, à la circulation du fluide [12].

Ces pompes peuvent être encore divisées en sous-types à savoir : les pompes rotatives (à engrenage, à palettes, à lobes) et les pompes linéaires (à piston, à membrane) [13].



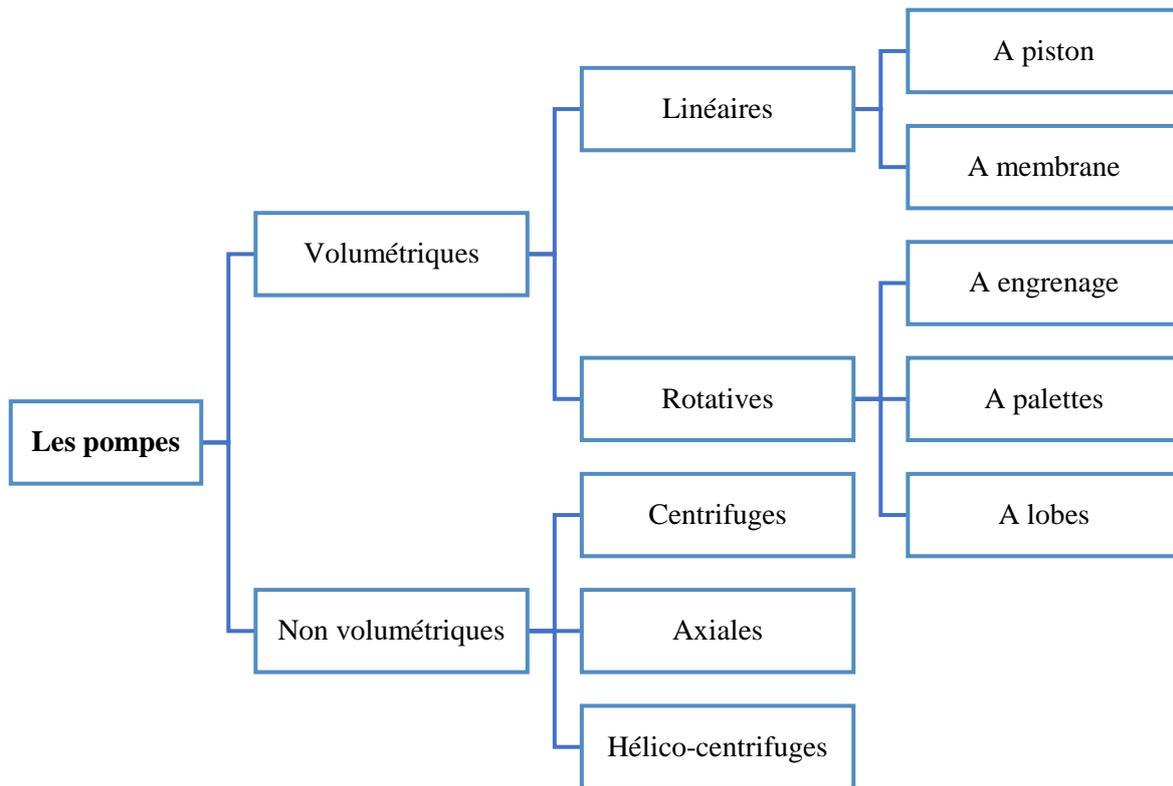
**Figure III.1 : Pompes volumétriques**

- Les pompes non volumétriques (centrifuges) : contrairement au type précédent, dans ces pompes la séparation entre la chambre d'admission et la chambre de refoulement est inexistante [13]. Sur la pompe centrifuge, la transmission de l'énergie se fait de manière hydrodynamique, tel que le fluide est accéléré par la roue de la pompe se déplaçant à une vitesse de rotation élevée. Suivant le sens dans lequel le fluide est refoulé, les pompes non volumétriques peuvent être : centrifuges, hélico-centrifuges et axiales [14].



**Figure III.2 : Pompes non volumétriques**

La figure suivante illustre plus clairement les types de pompes susmentionnées.



**Figure III.3 : Les types de pompes**

Dans le système étudié, les deux (2) pompes sont de type volumétrique à palettes à cylindrée variable (autorégulatrices), et ce en raison du manque d'étanchéité des pompes centrifuges qui ne permettent pas de soutenir des pressions élevées ainsi que l'aspect visqueux que présente l'huile du système. De plus, les pompes à palettes présentent l'avantage de pomper des débits réguliers, permettent une marche réversible de la pompe et enfin ont l'avantage de fonctionner de manière silencieuse tout en offrant un rendement satisfaisant de 0,9 [9] [10].

### III.5.2. Zone 2

Récepteur hydraulique (actionneurs) : Dans un circuit hydraulique, les actionneurs constituent l'outil nécessaire à la conversion de l'énergie hydraulique en énergie mécanique.

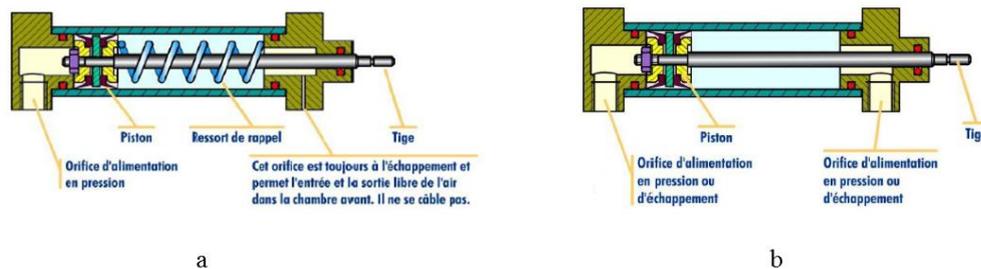
Cette conversion se fait soit par des mouvements rotatifs dus à la présence de moteurs, ou par des mouvements de translation linéaire effectués par des vérins [15].

Dans le cas du système étudié, ces éléments récepteurs constituent des vérins permettant de développer un effort très important avec une vitesse très précise [12]. Ils sont raccordés à des

valves de telle sorte que leurs mouvements permettent l'ouverture, partielle ou complète, ou la fermeture de ces valves.

Il existe principalement deux (2) types de vérins, subdivisés suivants les sens qu'ils adoptent, à savoir :

- Le vérin simple effet : La force dans ce type de vérin n'est applicable que dans un seul sens, tel que l'ensemble tige-piston se déplace sous l'effet de l'huile sous pression. Le second mouvement (le retour) s'effectue à l'aide d'un ressort de compression ou une charge. Le vérin simple effet présente l'avantage d'être économique et ne nécessite que peu de fluide pour son fonctionnement [15] [10].
- Le vérin double effet : Contrairement au cas précédent, le vérin double effet permet à l'ensemble tige-piston de se déplacer dans les deux sens sous l'action de l'huile. Deux (2) aires apparaissent alors, l'une pour l'exécution de la sortie de la tige et l'autre pour sa rentrée. Ce type de vérin offre une souplesse satisfaisante ainsi qu'un réglage de vitesse plus facile [15] [10].



**Figure III.4 : Vérin simple effet (a) et double effet (b)**

En raison de la simplicité des travaux effectués par les vérins sur le système étudié, le type simple effet est avantageux.

### III.5.3. Zone 3

Eléments de liaison : Composés principalement d'éléments permettant de relier les deux (2) zones précédentes, ainsi que d'autres composantes assurant un fonctionnement optimal et sécurisé du système.

Parmi ces éléments, ceux :

- Servant aux liaisons telles que les conduites,
- Utilisés pour la distribution comme les distributeurs,

- Nécessaires à la mesure, la protection et la régulation tels que : le régulateur de débit, les vannes, le limiteur de pression, les filtres, les manomètres, les débitmètres, le clapet anti-retour et enfin les accumulateurs.

Les détails propres à chaque élément sont présentés ci-dessous :

- Les conduites : Assurent le transport d'énergie fournie par la pompe hydraulique et ce en destination des récepteurs hydrauliques : les vérins.

Le choix de ces conduites repose sur deux importants facteurs physiques influençant la puissance, à savoir :

- Le débit à transporter  $q_v$ .
- La pression à supporter  $p$  [16].

Suivant le matériau utilisé ou sa rigidité, il existe plusieurs types de conduites. Dans le cas du présent système, ce sont les tuyaux d'acier rigides sans soudure qui sont installés.

La liaison des conduites aux composantes du système se fait à l'aide de raccords sous deux (2) formes : évasés et non évasés. De plus, quand il s'agit de raccorder des composantes mobiles l'une par rapport à l'autre ou présentant une certaine vibration, l'utilisation de boyaux (conduites souples) est recommandée, surtout que ces derniers peuvent aussi servir à absorber les changements de pression à travers leur léger gonflement [16].

Le choix des boyaux se fait en respectant les facteurs suivants :

- Une bonne résistance aux pressions et aux températures maximales du fluide.
  - Une compatibilité avec le fluide utilisé.
  - Un diamètre adéquat aux vitesses atteintes par le fluide.
- Les distributeurs : Servent à diriger le fluide sous pression vers le récepteur ou encore permettre son retour vers le réservoir, et ce à travers l'ouverture ou la fermeture d'une ou plusieurs voies de passage.

Suivant leur mode de fonctionnement, on distingue deux (2) type de distributeurs : à clapet et à tiroir. La différence entre les deux réside dans la présence ou pas de fuites internes permettant leur bon fonctionnement [12] [13].

- Distributeurs à clapet : Utilisés dans le cas des faibles débits et en présence d'une pression pouvant atteindre les 350 bar. Ils ne présentent pas de débit de fuite lors de la fermeture du passage et leur coût est très important par rapport au deuxième type [16] [17].

- Distributeurs à tiroir : Se caractérise par une construction simple pouvant porter d'importants débits et se composant de trois (3) parties : le corps, le tiroir et les éléments de commande qui peuvent être manuels, mécaniques, électriques, pneumatiques ou hydrauliques. Ils servent à diriger le fluide dans les parties où la pression qui résulte de sa circulation est nécessaire.

Leur principe de fonctionnement est simple, le tiroir se déplace vers la droite ou la gauche par action des éléments de commande, en se déplaçant le tiroir met en communications les orifices permettant le passage du fluide [16] [17].

Dans le cas de notre système, les distributeurs utilisés sont à tiroir et ce en raison de la faible résistance des distributeurs à clapet aux importantes débits. De plus, dans les systèmes hydrauliques où les coups de bélier sont envisageables, les distributeurs à tiroir sont préférables.

- Les accessoires de régulation et de mesure :

- **Le régulateur de débit** : Sert à maintenir le débit constant par rapport à une limite donnée, et ce en faisant varier la section à mince paroi de l'étranglement par lequel passe le fluide en la faisant plus ou moins ouvrir.

Cette variation dépend des pressions amont et aval de l'orifice tel qu'une quelconque variabilité de la pression permettra d'asservir l'étranglement et par conséquent conserver le débit [10] [12] [16].

Ces régulateurs existent sous trois (3) formes, à savoir : unidirectionnelle, bidirectionnelle et tridirectionnelle. La différence entre eux est représentée par les divers sens dans lesquels le fluide peut être orienté : un (1) seul sens pour le cas de l'unidirectionnelle, deux (2) sens pour le bidirectionnelle et trois (3) sens pour le tridirectionnelle.

Dans l'installation étudiée, les régulateurs sont bidirectionnelles tels qu'un sens permet de conduire le fluide (l'huile) du réservoir aux éléments récepteurs, et l'autre sens sert à drainer le fluide vers le réservoir en cas de problème.

- **Les vannes** : Dispositifs permettant d'autorisant ou d'interrompre le passage du fluide en question dans le système.
- **Le limiteur de pression** : Sert à limiter la pression passant dans le circuit à une valeur préalablement établie et ce en étant monté en dérivation avec le circuit. Si ce dernier connaît une surcharge, le limiteur de pression se met en marche et évacue le fluide en trop vers le réservoir. En effet, à son ouverture, la puissance hydraulique est abaissée et transformée en chaleur [13] [15].

Appelé aussi « soupape de sureté », ce dispositif a donc pour but de protéger la pompe ainsi que tous les autres composants du circuit contre les surcharges.

Le choix d'un limiteur de pression dans une installation devrait tenir compte des critères suivants [16] :

- L'évacuation d'un débit minimum vers le réservoir lors de l'activation du dispositif ;
  - Une mise en marche occasionnelle et non quotidienne ;
  - Réduction du bruit produit par l'activation du dispositif afin d'éviter toute incommodassions.
- **Les manomètres** : Appareils de mesure servant à indiquer la pression du fluide circulant dans le système [12]. Ils sont reliés au système de contrôle commande afin d'émettre des alarmes en cas de dépassement (si la pression dépasse l'intervalle donné).
- **Les débitmètres** : Appareils de mesure servant à évaluer le débit du fluide passant dans le circuit [12]. De même que les manomètres, les débitmètres sont reliés au système de contrôle commande afin de surveiller tout débordement du débit de son intervalle de sûreté.
- **Le clapet anti-retour** : Permet de faire passer le fluide dans un sens en interdisant l'autre [12]. Dans le présent cas, il permet d'éviter le passage du fluide de la pompe A vers la pompe B et vis versa, et ainsi garantir sa circulation vers les accumulateurs.
- **Les filtres** : Dispositifs permettant de protéger les composants sensibles d'un circuit en empêchant les impuretés, véhiculées par l'huile sous pressions, de s'infiltrer. Ils sont gradués suivant la grandeur des particules qu'ils peuvent retenir.

Le choix d'un filtre doit respecter les conditions ci-dessous :

- S'assurer du type d'installation établie ;
- Déterminer la pression régnant dans le système ;
- Evaluer les débits passant à travers ces dispositifs [16].

D'autre part, le choix de l'emplacement de ces dispositifs dépend de la sensibilité des éléments composant le circuit, d'ailleurs on retrouve trois (3) différentes installations :

- Au refoulement : le filtre est installé au refoulement de la pompe afin d'assurer la protection d'organes sensibles et des différents composants

hydraulique, tout en permettant d'arrêter des débris issus de l'usure de la pompe [9] [10] [13].

- Au retour : le filtre est monté sur la conduite de retour au réservoir. Dans ce cas, la totalité de l'huile est filtrée tel que les débris issus du vieillissement des divers éléments du circuit sont récupérés [9] [10] [13].
- A l'aspiration : l'installation se fait sur la partie aspiration de la pompe, par conséquent, seule la pompe est protégée. Par contre, l'inconvénient avec ce type d'installation est que la filtration est assez grossière (n'arrête que les grosses particules) et nécessite alors la présence de crépines afin d'augmenter le pouvoir de la filtration [9] [10] [13].

Les filtres utilisés dans le système étudié sont installés à deux (2) différentes positions, à savoir : A l'aspiration et au refoulement. De cette manière, l'huile passant dans le système et celle revenant au réservoir est convenablement traitée.

- **Les accumulateurs** : Il s'agit des éléments pour lesquels l'étude a été établie, et dont la description sera abordée plus en détails dans le chapitre suivant.

### III.6. Schématisation du circuit

Un système hydraulique est un assemblage de composants fonctionnant en interaction, dans le but d'utiliser un fluide sous pression (dans notre cas l'huile) pour effectuer un travail mécanique. Un tel système peut être représenté par une schématisation normalisée permettant de comprendre l'installation, plus précisément lors des différentes opérations de maintenance.

Pour ce faire, l'Organisme International de Normalisation (ISO), très répandues dans les secteurs industriels, a élaboré la norme ISO 1219 définissant les symboles graphiques hydrauliques et pneumatiques (ISO 1219-1) ainsi que la codification des schémas de circuits dans ces domaines (ISO 1219-2) [18].

#### III.6.1. Schéma de l'installation

Les schémas de circuits constituent une aide facilitant la compréhension, l'étude et la description des installations. Ils permettent ainsi de suivre les mouvements et les commandes au cours du cycle.

Suite à la complexité du système étudié, une représentation simplifiée a été élaboré afin de voir avec plus de clarté l'agencement des composants. Et ce par l'utilisation d'un logiciel d'aide à la conception : **FluidSim**.

La figure suivante est le résultat de cette représentation.

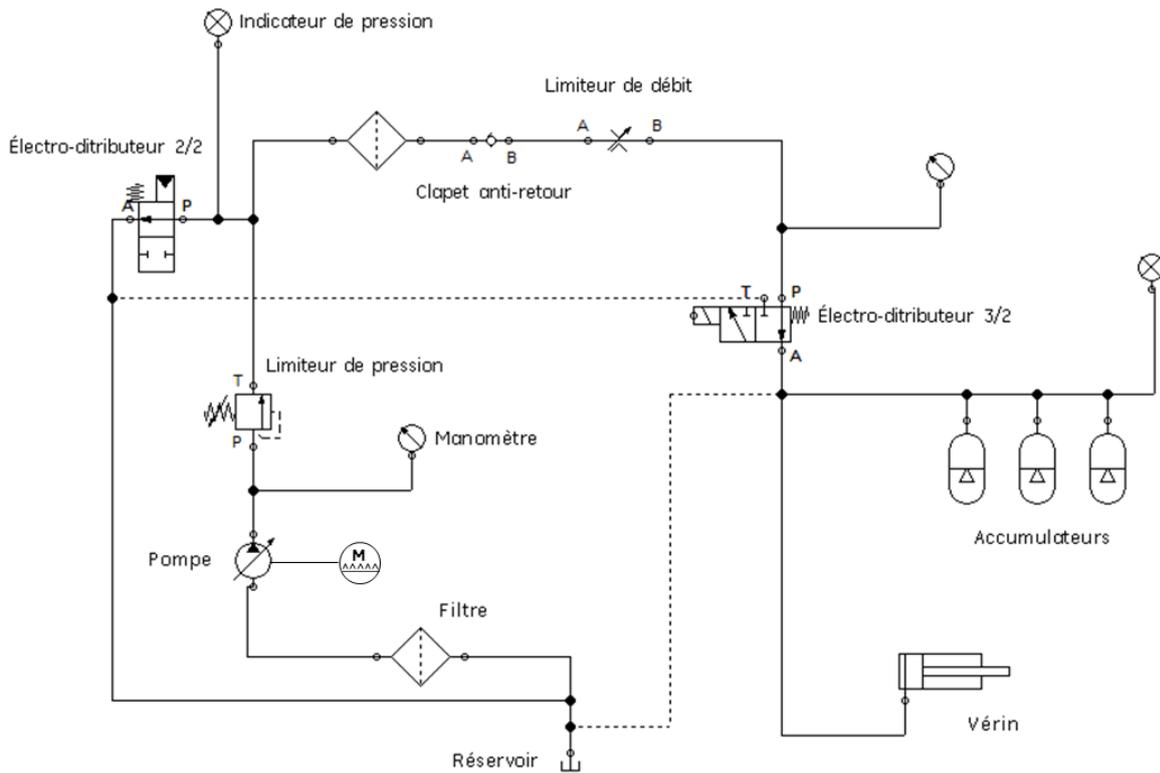


Figure III.4 : Schéma du système hydraulique étudié

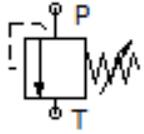
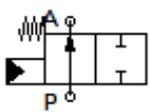
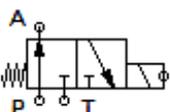
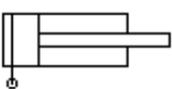
### III.6.2. Symboles des composants

Les équipements et leurs connexions sont représentés soit par leurs symboles détaillés, ou bien par leurs symboles simplifiés.

Afin de mieux comprendre le schéma, le tableau suivant regroupera l'ensemble des symboles des différents appareils installés.

Tableau III.1 : Symboles des composants du schéma hydraulique

	Symbole	Dénomination
<b>Zone 1</b>		Réservoir
		Filtre
		Pompe volumétrique à cylindre variable
		Moteur hydraulique

<b>Zone 2</b>		Manomètre
		Limiteur de pression
		Électro-distributeur 2/2 piloté
		Indicateur de pression
		Clapet anti-retour
		Limiteur de débit
		Électro-distributeur 3/2 à commande hydro-électrique
		Accumulateur
<b>Zone 3</b>		Vérin simple effet

---

# **CHAPITRE IV : LES ACCUMULATEURS HYDRAULIQUES**

---

## Chapitre IV : Les accumulateurs hydrauliques

### IV.1. Introduction

Les techniques de stockage d'énergie connaissent, depuis le début de l'ère industrielle, un développement considérable, et ce pour répondre à certains besoins à savoir, atténuer l'effet d'une hausse ou baisse de pression, assurer une réponse rapide lors d'un dysfonctionnement de la machine et finalement, garantir la protection des équipements en assistant la machine lors d'un arrêt brusque.

Dans ce chapitre un intérêt particulier est porté sur l'un des équipements permettant un stockage d'énergie pour la restituer ensuite au système hydraulique suite à une demande particulière.

### IV.2. Généralités

L'accumulateur peut être défini comme une réserve d'énergie sous pression. Il donne une apparence de compressibilité à un liquide incompressible en emmagasinant un volume variable d'un liquide sous la pression d'un gaz pour le restituer ensuite au système hydraulique.

Le stockage de l'énergie s'opère en comprimant le gaz enfermé dans la vessie, ce qui permettra au fluide de pénétrer à l'intérieur du corps de l'accumulateur, et ce quand la pression du système est supérieure à celle des accumulateurs. Inversement, l'énergie est restituée quand la pression au niveau des accumulateurs est supérieure à celle du système ; le temps nécessaire à la restitution de l'énergie dépend du débit de fluide évacué.

Le rôle principal des accumulateurs hydrauliques est d'emmagasiner un certain volume de fluide sous pression et le restituer ensuite pour assister la pompe, ils permettent également de maintenir une pression constante dans tout le circuit pendant les périodes de transition du régime, en absorbant les pics et en délivrant instantanément un débit avant que la pompe agisse.

De plus, les accumulateurs sont utilisés pour répondre à certaines problématiques comme :

- Les dilatations thermiques ;
- Le cumul de puissance ;
- L'amortissement des chocs dans les démarrages ou les arrêts des installations ;
- L'amortissement des pulsations... [19].

#### IV.4. Principe de fonctionnement

De par leur nature, les liquides ont une compressibilité très faible ce qui rend difficile le stockage de leur énergie dans des volumes restreints, néanmoins ils peuvent transmettre des efforts importants contrairement aux gaz.

En effet, ces derniers possèdent un taux de compressibilité très important et peuvent donc emmagasiner une énergie considérable sous un faible volume. L'accumulateur hydropneumatique réalise l'association de ces deux propriétés en permettant au gaz de communiquer son élasticité au fluide de service.

Avant la mise en marche des pompes, la vessie est remplie d'Azote à une pression  $P_0$  à l'aide d'une valve de remplissage, par conséquent elle prend la forme du corps de l'accumulateur. Quand la pression du fluide traversant le système est supérieure à  $P_0$ , le gaz se comprime à une pression  $P_1$  permettant à l'huile de pénétrer dans l'accumulateur. Dans le cas contraire, le fluide se répand dans le système hydraulique une fois que la pression du système passe sous la pression du gaz. Autrement dit toute baisse de pression au niveau du fluide de service entraîne la détente du gaz et provoque forcément la restitution du fluide par les accumulateurs.

Lorsque le coussin gazeux est entièrement comprimé, la pression de l'azote et celle du fluide de service sont égales. Il se dilate au fur et à mesure que la pression du système hydraulique baisse, forçant ainsi la restitution du fluide par l'accumulateur. La dilatation de la vessie s'effectue progressivement jusqu'à ce que sa pression atteigne la pression recommandée (qui est forcément inférieure à la pression nominale du système), une fois que la pression hydraulique est atteinte, la vessie occupe à nouveau entièrement le volume de l'accumulateur.

Une vanne à clapet empêche la vessie d'être tirée vers l'aval de l'accumulateur, car si cela se produit l'accumulateur risque de ne plus jamais pouvoir se recharger. Par conséquent l'écoulement de la pompe peut être étouffé [20] [25].

La déformation de la vessie peut se manifester sous diverses formes [23] :

- Position repos : Dans cette position, l'azote renfermé dans la vessie occupe l'intégralité du volume de l'accumulateur, quant à la pression elle est égale à la pression de gonflage de la vessie. La valve supérieure de l'accumulateur se ferme évitant ainsi toute perte de gaz.
- Pression minimale de service : Correspond à la pression de travail minimale. Dans ce cas la vessie se comprime et son volume se réduit au profit du volume d'huile.
- Pression maximale de service : Correspond à la pression maximale de travail. Dans cette forme, la pression augmente au fur et à mesure que la vessie se comprime, la différence entre le volume de la vessie dans les deux dernières positions correspond au volume de fluide accumulé.

## IV.5. Fonctions de l'accumulateur

L'accumulateur peut avoir diverses fonctionnalités, à savoir [24] :

- **Anti-bélier** : Consiste à stocker l'énergie cinétique engendrée par le volume de fluide en mouvement lors d'une fermeture rapide du circuit ou, plus généralement, lors d'un changement brutal de pression dans le système hydraulique.
- **Dilatation thermique** : L'installation d'un accumulateur dans un circuit hydraulique fermé compense la variation de volume provoquée par les fluctuations de température. Par conséquent régularise la variation de volume des fluides de service.
- **Amortissement de chocs** : Le rôle principal des amortisseurs de l'accumulateur est de réduire la fatigue des composants mécaniques et hydrauliques. L'amortissement des chocs, permet un bon déroulement des manœuvres en minimisant les accidents et en prolongeant la durée de vie des équipements.
- **Récupération et restitution d'énergie** : L'accumulateur assure l'absorption de l'énergie engendrée par la descente d'une charge et la restitue par la suite à un récepteur hydraulique pour la transformer en mouvement mécanique. Exemple : Ouverture et fermeture des portes séparant les wagons.
- **Compensation de fuites** : La présence d'une fuite dans un circuit hydraulique provoque une chute de pression. La mise en place d'un accumulateur permet de compenser la perte de volume entraînée par une fuite et maintient donc une pression approximativement constante.
- **Amortissement des pulsations** : Les pulsations des pompes génèrent des vibrations et du bruit, la mise en place d'un accumulateur dans un circuit hydraulique limite le pourcentage d'irrégularité des pompes et améliore le fonctionnement du système. De plus, l'accumulateur assure une protection des équipements permettant ainsi une augmentation de leur durée de vie.
- **Réserve d'énergie** : Le rôle principal d'un accumulateur est de stocker l'énergie sous forme de fluide hydraulique sous pression, pour suppléer aux demandes du système. Cette énergie correspond au volume de fluide emmagasiné au moment où la pression passe d'une valeur minimale à une valeur maximale. La restitution de l'énergie doit se faire dans un laps de temps très réduit afin d'atténuer les effets de la variation de pression sur les équipements de la machine.

### **IV.3. Types d'accumulateurs**

#### **IV.3.1. Accumulateur à diaphragme**

L'accumulateur à diaphragme est constitué de deux parties détachables, boulonnées ou vissées l'une à l'autre, et séparées par une membrane flexible appelée diaphragme. Cette dernière possède une forte résistance aux réactions chimiques, aux hautes et basses pressions ainsi qu'aux forces de cisaillement exercées tout au long des cycles de fonctionnement.

Ce type d'accumulateur n'est pas recommandé pour les grands volumes du fait de sa faible capacité de stockage, qui peut être désavantageuse dans certains cas bien qu'elle lui permette d'atteindre un rapport de compression très satisfaisant.

En revanche, il est souvent utilisé en aéronautique dans la mesure où le rapport masse/volume de la forme sphérique est faible, de même, il est utilisé dans le cas des utilisations non centralisées car il est facile à transporter, à installer et à réparer. L'accumulateur à diaphragme possède une longue durée de vie et une fiabilité incomparable [20] [22].

#### **IV.3.2. Accumulateur à piston**

L'accumulateur à piston est constitué de deux chambres isolées l'une de l'autre par un piston étanche, la chambre contenant l'huile est connectée au circuit hydraulique de l'installation de telle façon que l'accumulateur soit chargé et le gaz soit comprimé une fois que le système est mis en marche.

Le piston de séparation est doté de joints d'étanchéité adaptés au fluide utilisé et à la température ambiante, son rôle principal est de réduire l'effet des pics de pression afin de minimiser les risques dus à une compression rapide de l'azote.

Ce type d'accumulateur permet de supporter des rapports volumétriques très importants, il ne nécessite aucun entretien ni gonflage et il assure une vidange complète et rapide. De plus, il garantit une étanchéité incomparable ainsi qu'une très bonne résistance aux pressions intenses.

Bien qu'il semble être l'outil révolutionnaire pour atténuer les variations brusques de pression, son temps de réponse reste néanmoins relativement long par rapport aux autres types d'accumulateurs. Il est également prédisposé à toute contamination et dépôt de particules polluantes, de ce fait, il est préférable de l'installer verticalement [21].

#### **IV.3.3. Accumulateur à vessie**

Appelé également hydropneumatique, ce type d'accumulateur est constitué d'une vessie séparant deux chambres, l'une contenant un gaz et l'autre un fluide de service (l'huile dans notre cas). Il est muni d'une ouverture assez large permettant d'introduire la vessie, celle-ci est maintenue en place grâce à un bouchon qui renferme la valve de remplissage d'air.

Grace à la compressibilité de l'azote, l'accumulateur à vessie permet la restitution de l'huile emmagasinée sous pression. Le choix de l'azote se justifie d'une part, par le fait qu'il soit présent en grande quantité dans l'atmosphère, et d'autre part par le fait qu'il soit ininflammable.

Dans le cas du HPU-250V, le premier compartiment de l'accumulateur est pré chargé d'azote sec à environ 60% de la pression globale du système. L'autre compartiment contient l'huile qui provoque la compression de la vessie d'un volume équivalent à celui qu'elle occupe et qui est par la suite refoulée au moment où la pression du système rechute.

Chacun des accumulateurs est fourni d'une soupape à bille d'isolement ainsi qu'une vanne de drainage, afin d'assurer l'isolation et le drainage nécessaire quand la machine est en marche.

Dans le cas de la présente étude au niveau de la station de Hadjret Enouss, le système hydraulique est équipé de trois accumulateurs à vessie, ce choix est dû au temps de réponse qui le caractérise. Effectivement l'accumulateur à vessie possède un temps de réponse relativement court par rapport aux deux autres types d'accumulateurs, il assure ainsi une restitution complète en un laps de temps très réduit [20] [21].

## **IV.6. Installation des accumulateurs**

### **IV.6.1. Considérations**

#### **IV.6.1.1. Le type d'accumulateur**

Les accumulateurs sont classés en trois catégories : les accumulateurs à vessie, les accumulateurs à piston et les accumulateurs à membrane. Ce classement est fait suivant leurs modes de fonctionnement et plus précisément, la manière dont ils restituent le fluide de service.

Le choix de l'accumulateur dépend principalement de son rôle dans le circuit, qui varie d'un système hydraulique à un autre. Il dépend également du volume qu'on cherche à restituer, l'accumulateur à piston à titre d'exemple est caractérisé par sa grande capacité de stockage.

D'autre part, le temps de réponse est un facteur important dans le choix de l'accumulateur, étant donné qu'il reflète sa performance.

#### **IV.6.1.2. Le volume**

La capacité de stockage de l'accumulateur est une caractéristique principale, elle correspond à la quantité de fluide permettant une bonne compensation volumique en cas de fuites, de variations de pression, ou encore une défaillance au niveau de la pompe hydraulique.

Ce volume varie selon le type d'accumulateurs, certains d'entre eux, peuvent contenir des volumes importants alors que d'autres n'ont pas cette aptitude.

L'équation représentant la transformation poly-tropique du gaz est la suivante :

$$pV^n = p_0V_0^n \quad (1)$$

Si  $V_f$  et  $p_f$  correspondent respectivement au volume et la pression de l'accumulateur quand il est rempli avec la quantité désirée du fluide, et que d'autre part,  $V_e$  et  $p_e$  correspondent respectivement au volume et la pression de l'accumulateur à l'état vide, le volume de stockage est  $V_s$  avec :

$$V_s = V_e - V_f \quad (2)$$

A partir de l'équation (1) :

$$p_f V_f^n = p_e V_e^n \quad (3)$$

En remplaçant  $V_f$  dans l'équation (3) on aura

$$V_e = \frac{V_s}{1 - \left(\frac{p_e}{p_f}\right)^{\frac{1}{n}}} \beta \quad (4)$$

Avec,  $\beta = 1.24$  pour un accumulateur à vessie.

#### IV.6.1.3. La pression nominale du système

De par sa définition, la pression nominale correspond à la pression que peut supporter le système sans qu'il y ait la moindre défaillance, et pour laquelle la sécurité des équipements est garantie. Elle varie dans le temps selon la température et est mesurée quand la pompe n'est pas fonctionnelle.

#### IV.6.1.4. Pression minimale du système

Correspond à la plus faible pression que doit maintenir l'accumulateur dans le système, elle doit être prise en considération lors de la conception de l'accumulateur. La pression minimale varie d'un accumulateur à un autre suivant l'espace de stockage réservé au fluide de service qui varie selon les besoins du système.

#### IV.6.1.5. Pression de pré-charge

Le choix de la pression de pré-charge est fondamental pour obtenir le meilleur rendement, elle est toujours définie pour la température maximale de service.

Théoriquement, le rendement maximal est acquis avec une pression de pré-charge très proche de la pression minimale utile de fonctionnement.

Cette pression correspond à la pression de l'azote dans l'accumulateur en l'absence de l'huile de service, de plus, elle détermine le volume de fluide à stocker.

#### **IV.6.1.6. Débit exigé**

Il s'agit d'une donnée indispensable suivant laquelle s'effectue le dimensionnement de tout le système. Pour maintenir la pression exigée, l'accumulateur doit assurer la restitution d'un débit important dans un laps de temps bien déterminé.

Le volume du fluide hydraulique correspond à

$$Q \times t$$

Avec, Q : débit du fluide et t : temps de réponse de l'accumulateur.

La restitution s'opère au moment où la pression du gaz est comprise entre la pression minimale et la pression de pré-charge du système.

#### **IV.6.1.7. Temps de réponse**

C'est le temps écoulé entre la variation de pression dans le système et le déclenchement des accumulateurs, autrement dit, il correspond au temps nécessaire à la restitution du volume de fluide de service dans le système, il dépend de la pression de pré-charge et de l'orifice de l'accumulateur.

Le temps de réponse de l'accumulateur est une caractéristique fondamentale sur laquelle se base le choix du type d'accumulateur, le raccourcissement du temps de réponse entraîne une optimisation dans le temps d'action des accumulateurs, et atténue ainsi les dégâts.

#### **IV.6.1.8. Temps de recharge**

Correspond au temps nécessaire pour charger la totalité de l'accumulateur autrement dit, c'est le temps qu'il faut pour que le fluide remplisse l'accumulateur à partir du débit disponible fourni par la pompe.

#### **IV.6.1.9. Type de fluide**

L'accumulateur à vessie est constitué de deux compartiments, l'un contient un fluide hydraulique alors que l'autre est chargé de gaz. Les fluides de service doivent être compatibles avec les matériaux utilisés dans la conception de l'accumulateur pour éviter toute sorte de contamination ou de réaction chimique [20].

### **IV.7. Conclusion**

L'étude bibliographique sur les accumulateurs a montré l'existence de trois types différents, chacun d'entre eux représente des avantages et des inconvénients d'où l'importance d'une étude technique avant le choix de ces derniers, il est important de prendre en considérations certains facteurs qui ont sans doute un grand impact sur tout le système hydraulique. Chaque type d'accumulateur répond à un besoin bien déterminé à savoir un temps de réponse très réduit, une capacité de stockage importante ou même encore une bonne résistance aux pressions intenses.

---

# **CHAPITRE V : LES FLUIDES HYDRAULIQUES**

---

## Chapitre V : Les fluides hydrauliques

### V.1. Introduction

Dans une installation hydraulique, le fluide assure la transmission d'énergie aux organes du système via des pompes. Ces organes peuvent être des vérins ou des moteurs hydrauliques.

Le choix de l'huile peut affecter la qualité de fonctionnement du système ainsi que la durée de vie du matériel utilisé. C'est pourquoi, en vue d'optimiser le fonctionnement de l'installation, l'huile hydraulique doit répondre à certains critères tels que le pouvoir lubrifiant, la neutralité chimique, le pouvoir anticorrosion, une très faible compressibilité...etc.

Généralement, une seule huile ne rassemble pas toutes ces qualités, cependant il existe plusieurs types d'huiles hydrauliques classées en fonction de leurs finalités, de façon à ce que dans chaque type d'huile hydraulique certaines caractéristiques sont plus dominantes par rapport à d'autres.

### V.2. Généralités sur les fluides hydrauliques

La fonction principale d'un fluide hydraulique, au sein d'un système, est de transmettre la force appliquée en un point à un autre, cette opération doit s'établir avec précision et dans un laps de temps très réduit étant donné que c'est ce qui détermine la performance du fluide hydraulique utilisé.

On entend par un fluide hydraulique efficace, un fluide qui s'écoule facilement peu importe la température d'opération du système hydraulique. Par ailleurs, les conditions de service doivent assurer un fonctionnement optimal.

Pour achever avec satisfaction ses fonctions, le fluide hydraulique doit disposer de certaines qualités telles que :

- Un bon coefficient de transfert de chaleur ;
- Un pouvoir anti usure ;
- Une bonne résistance au feu ;
- Un bon pouvoir lubrifiant... [26]

### V.3. Fonctions et sollicitations des fluides hydrauliques

Généralement, on définit vingt et une (21) caractéristiques ou qualités qu'il y a lieu de prendre en considération, à savoir [26] :

- Stabilité à la chaleur, à l'oxydation et à l'hydrolyse ;

- Propriétés « viscosité-température » ;
- Résistance au feu ;
- Module de compressibilité ;
- Aptitudes lubrifiantes ;
- Compatibilité et non-corrosivité vis-à-vis des matériaux constituant le système hydraulique ;
- Volatilité ;
- Résistance aux radiations ;
- Tendance à la détérioration ;
- Facteur coût compte tenu des performances ;
- Durée de service ;
- Tendance à la cavitation ;
- Toxicité ;
- Facilité de manipulation et de stockage ;
- Coefficient de transfert de chaleur ;
- Coefficient d'expansion ;
- Masse volumique ;
- Compatibilité avec les autres matériaux extérieurs au circuit hydraulique et se trouvant à proximité dans la machine ;
- Propriétés électriques telles que conductivité, constante diélectrique... ;
- Tendance au moussage, persistance de la mousse et relargage des gaz occlus ;
- Possibilité de régénération...etc ;

La liste des propriétés recommandées ne se réduit pas à ce qui vient d'être susmentionné. Néanmoins, dans le choix des fluides hydrauliques il est important de tenir compte des caractéristiques de l'équipement ainsi que les conditions de fonctionnement.

En pratique, le fluide hydraulique s'adapte forcément aux régimes de fonctionnement pour lesquels il est employé. Il doit obligatoirement disposer d'une bonne stabilité thermique, et il est préférable qu'il possède aussi une bonne résistance à l'oxydation et un bon facteur de compressibilité. Or dans le cas où le fluide hydraulique est utilisé sous haute pression, une autre caractéristique s'impose, celle de la résistance au feu [26].

### **V.3.1. Résistance à la dégradation**

Un fluide hydraulique destiné à travailler sous des températures élevées doit avoir une excellente stabilité thermique, associée à une bonne résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse.

Ainsi, un fluide exposé à la chaleur ne doit pas engendrer rapidement des quantités excessives de matières parasites telles que des boues, des vernis et des matières corrosives qui perturberaient la bonne marche du système en contrariant les débits, en colmatant certains orifices ou filtres, et en favorisant l'usure des surfaces en contact.

La dégradation du fluide peut encore se manifester par des produits gazeux de décomposition qui peuvent être à l'origine d'un phénomène de cavitation. En fait, cette cavitation risque de se produire chaque fois que, dans un système liquide-gaz, il se forme des poches de gaz qui peuvent être comprimées par la suite.

La dégradation thermique est accélérée par la présence d'oxygène. Dans un circuit hydraulique fonctionnant à haute température, tout est mis en œuvre pour éviter le contact avec l'air. Néanmoins, il est très difficile d'éviter tout contact du seul fait qu'il existe toujours une certaine quantité d'oxygène dissous dans le fluide. D'un autre côté, cet oxygène n'a pas que des effets néfastes car, avec certains métaux, il forme des films d'oxyde protecteurs qui facilitent la lubrification et évitent la corrosion.

Il en va de l'eau comme de l'oxygène. Il est aisé de se protéger des entrées d'eau en équipant les réservoirs d'évents de respiration capables de stopper l'humidité, mais, dans un système hydraulique étendu, il est impossible de maintenir le fluide complètement anhydre. Il faut donc tenir compte de la résistance à l'hydrolyse lors du choix du fluide hydraulique [26].

### **V.3.2. Pouvoir lubrifiant**

L'une des fonctions principales des fluides hydrauliques est la lubrification des pièces les plus susceptibles d'être usées suite aux mouvements mécaniques.

La lubrification se fait selon les conditions de fonctionnement du système hydraulique, elle peut se faire en régime hydrodynamique ou en régime onctueux. Par conséquent, il faut adapter les qualités lubrifiantes du fluide hydraulique.

Il existe d'autres éléments influençant le niveau de performance du lubrifiant : le type de pompe utilisé ainsi que la pression de service [27].

### **V.3.3. Caractéristiques de viscosité**

Un fluide de viscosité mal adaptée peut causer des défaillances plus ou moins graves tels que le glissement de la pompe, l'usure due au frottement, les fuites...etc.

En effet, une viscosité trop forte engendre des frottements internes plus importants provoquant ainsi une hausse de température. De même, une viscosité faible favorise les fuites,

elle peut provoquer un glissement de la pompe qui se traduit par une perte de rendement, une hausse de température ainsi que la dégradation de la qualité des pièces en mouvement.

Pour que la viscosité soit stable, le fluide doit avoir un bon indice de viscosité, soit sensible au cisaillement et enfin sa viscosité ne doit pas augmenter en vieillissant [27].

### V.3.3. La corrosion

La corrosion est le résultat de l'action qu'exerce un réactif liquide ou gazeux sur un métal ou un alliage. Sa forme la plus connue est la rouille du fer exposé à l'air humide. Ce phénomène se produit suite à une interférence du fluide avec le système hydraulique.

Généralement trois types de corrosion peuvent se manifester :

- La corrosion électrochimique ;
- La corrosion érosive ;
- La corrosion fissurante sous contrainte.

Le premier type est le plus dangereux, il se manifeste par une attaque uniforme ou intergranulaire. La corrosion érosive quant à elle se produit généralement sur les surfaces animées de mouvements légers. Malencontreusement, sa prévision est très difficile car il se manifeste en cours de service, ce qui complique encore plus de problème [27]

## V.4. Classification des fluides hydrauliques

Les fluides hydrauliques ne diffèrent des huiles lubrifiantes que par des détails. En effet, sous des conditions d'utilisation normales, une huile minérale peut jouer le rôle d'une huile lubrifiante et d'un fluide de contrôle hydraulique en même temps.

Ces fluides hydrauliques sont obtenus par transformation chimique du pétrole. La seule différence réside dans le processus de raffinage. Dans le cas des huiles minérales, les impuretés sont éliminées au cours de processus de raffinage. Or, dans le cas des huiles de synthèse, le processus est plus élaboré et permet de modifier la composition des molécules pour les rendre plus homogènes. Cela permet d'obtenir des qualités lubrifiantes améliorées :

- **Les huiles minérales** : sont les plus utilisées. Elles sont composées d'huile aromatique, d'hydrocarbure saturé de type naphène et d'hydrocarbure de type paraffine, et comportent des additifs qui permettent d'adapter leurs propriétés à certaines fonctions spécifiques.
- **Les huiles synthétiques** : ont pour intérêts d'être multigrades, et sont généralement utilisées sur une plage de température très étendue (à très basse ou très hautes températures). De plus, leurs viscosités varient peu avec la température [26]

## V.5. Propriétés des fluides hydrauliques

### V.5.1. La masse volumique

#### V.5.1.1. Généralités

Cette grandeur physique correspond à la masse d'un matériau par son unité de volume, elle s'exprime en  $\text{Kg}/\text{m}^3$ , et est donnée par  $\rho = m/V$ .

La masse volumique dépend des conditions de l'environnement dans lequel on cherche à la mesurer, elle varie en fonction de la température et la pression et cette variation est généralement plus remarquable dans le cas des gaz.

Quand la pression est constante, une augmentation de pression entraîne la dilatation de la substance chimique étudiée, cette dernière occupera un volume plus important que le volume initial, et par conséquent sa masse volumique diminue.

En outre, quand la température est constante, l'augmentation de pression engendre une compression du fluide qui occupe un volume moins important que le volume initial et par conséquent la masse volumique augmente [27].

La masse volumique des huiles hydrauliques varie dans d'assez grandes proportions, le tableau suivant regroupe les différents types d'huiles hydrauliques ainsi que leurs masses volumiques :

**Tableau V.1 : Masses volumiques des principales huiles**

Type d'huile hydraulique	Masse volumique $\text{Kg}/\text{m}^3$
Huiles à base minérale semi-synthétique ou synthétiques classiques	850 – 920
Huiles minérales utilisées en aéronautique	860 – 900
Huiles pour automobiles	900
Huiles de synthèse de type poly glycol	1000
Fluides synthétiques difficilement inflammables	> 1000

### V.5.1.2. Influence de la température sur la masse volumique

Les fluctuations de températures affectent le volume créant ainsi une variation de volume exprimée par la relation suivante :

$$\Delta V = V \alpha \Delta T$$

Avec,  $\alpha$  : Coefficient de dilatation, dans le cas des huiles minérales  $\alpha = 7 \times 10^{-4} / \tau$ .

Sous pression atmosphérique normale et à une température  $T^\circ$ , la masse volumique est alors calculée par la relation suivante :

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

Avec,  $\rho_{15}$  : Valeur de la masse volumique à 15° C.

La figure ci-dessous illustre l'influence de la température sur la masse volumique des fluides hydrauliques [27].

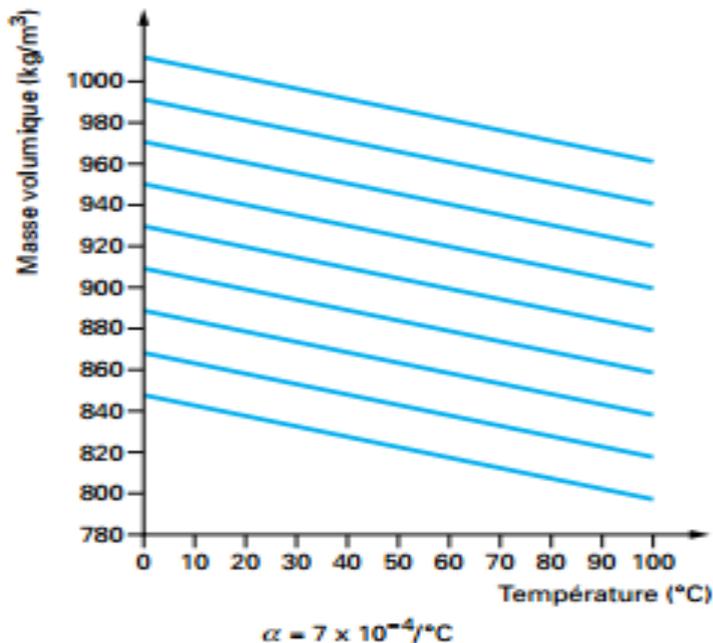


Figure V.1 : Variation de la masse volumique en fonction de la température

### V.5.1.3. Influence de la pression sur la masse volumique

La compressibilité des huiles hydrauliques est très faible, néanmoins, elle n'est pas négligeable lors d'une utilisation sous haute pression.

Lorsqu'une huile hydraulique est mise sous pression à une température constante, la diminution du volume est provoquée par une hausse de pression exprimée par la relation suivante :

$$\Delta V = V \beta \Delta P$$

Avec,

$\beta$  : Le coefficient de compressibilité qui est défini par le rapport suivant :

$$K = 1/\beta$$

La variation de la masse volumique est exprimée alors par la relation suivante :

$$\rho = \frac{\rho_{15}}{1 - \beta \propto P}$$

La figure suivante démontre l'influence de la pression sur la masse volumique des fluides hydrauliques [27].

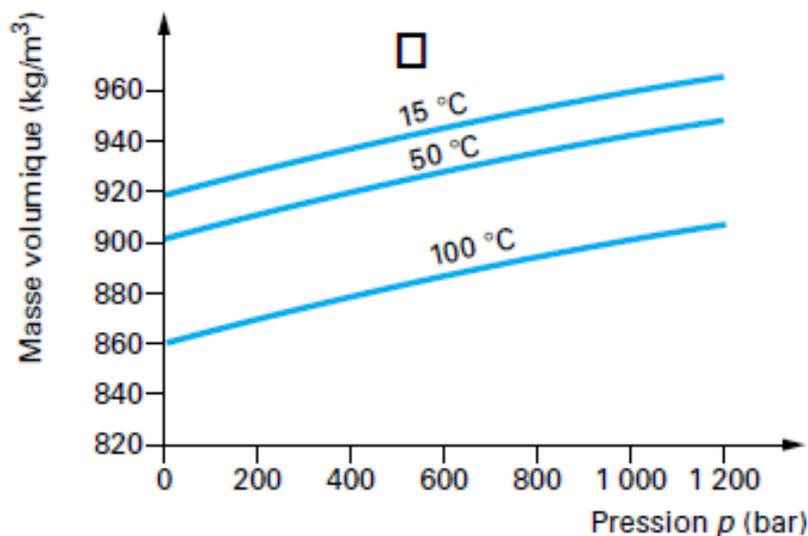


Figure V.2 : Variation de la masse volumique en fonction de la pression

### V.5.2. La viscosité

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

La viscosité d'un fluide hydraulique est la propriété qui caractérise la résistance de ce liquide à l'écoulement. Plus précisément, la viscosité résulte de la résistance qu'opposent les molécules du fluide à des efforts qui tendent à les déplacer par glissements relatifs en son sein. Un liquide homogène, de masse volumique supposée constante, subit des déformations relatives (glissements ou cisaillements) auxquelles il oppose une résistance mesurable.

Selon leur comportement rhéologique, les fluides peuvent être classés en deux catégories : les fluides dits « newtoniens » et les fluides dits « non newtoniens »

Un fluide peut être alors défini comme une substance qui présente une déformation continue sous l'effet d'une contrainte de cisaillement. La viscosité absolue dynamique est la viscosité la plus pertinente pour tous les calculs, et dont la valeur est tirée de la loi de Newton qui régit l'écoulement laminaire d'un fluide visqueux [26] [27].

### V.5.2.1. Viscosité dynamique

La viscosité dynamique représente la résistance d'un fluide à l'écoulement, en d'autres termes, la facilité avec laquelle il se déforme sous l'action des contraintes mécaniques.

Elle exprime une caractéristique de frottement entre deux couches du même fluide et elle influe le comportement du fluide lors de son écoulement.

Dans le cas d'un liquide, la viscosité dynamique varie en fonction de la température, effectivement, l'augmentation de température intensifie les espaces intermoléculaires et réduit les frottements d'où la réduction de la viscosité dynamique.

Par contre, dans le cas d'un gaz, la viscosité est proportionnelle à la pression et à la température. C'est-à-dire que l'augmentation de la pression accentuent les frottements entre les molécules, de plus, une hausse de température entraîne une élévation de la vitesse des molécules, ainsi qu'une augmentation du taux de collision de ces dernières, ce qui a pour conséquence l'accroissement de la viscosité dynamique [27].

### V.5.2.2. Coefficient de viscosité

Le coefficient de viscosité peut être défini comme un coefficient de diffusion de la quantité de mouvement ou encore comme un facteur de proportionnalité entre la tension tangentielle  $F/S$  et le gradient de vitesse  $dv/dx$ , exprimée par la relation suivante :

$$F/S = \eta \frac{dv}{dx} \quad (1)$$

Les liquides dont l'écoulement obéit à cette loi sont connus sous la nomination des fluides Newtoniens, leur viscosité reste constante à une température et pression constantes.

La contrainte de cisaillement s'écrit :  $\tau = F/S$  (2)

Quant à la vitesse de déformation, elle s'écrit :  $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dx}$  (3)

Par conséquent, en remplaçant l'équation (3) dans (1) on aura :

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta}$$

Dans le cas des fluides non-newtoniens, la viscosité dynamique est fonction de la température  $T$  et de la pression  $P$  en plus de la contrainte de cisaillement  $\tau$  ou même la vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$  [26].

### V.5.2.3. Influence de la température sur la viscosité

La viscosité des fluides hydrauliques est extrêmement sensible à l'influence de la température. Aux basses températures, ces liquides deviennent de plus en plus visqueux jusqu'au moment où, dans le cas de l'huile par exemple, cette dernière se retrouve figée.

Par contre, pour de hautes températures, la viscosité des fluides décroît très rapidement jusqu'à arriver à un moment où l'ébullition commence à se manifester à travers une formation de bulles et ainsi, parmi d'autres ennuis aisément imaginables, entraîner la cavitation des pompes.

Entre ces deux extrêmes, le fluide hydraulique doit pouvoir assumer sa fonction dans une gamme de températures aussi large que possible. L'idéal serait que cela puisse s'accomplir en conservant la même viscosité mais, devant cette utopie, il faut se contenter d'une variation aussi réduite que possible, ce qui, de façon chiffrée, se traduit par une valeur élevée de l'indice de viscosité.

Pour chaque nature de fluide hydraulique, une courbe de viscosité peut être tracée en fonction de la température. Une représentation commode de cette courbe est ainsi obtenue en utilisant en ordonnées :  $y = \lg \lg \nu$ , et en abscisses :  $x = \lg T(K)$ .

$T$  étant la température absolue.

L'influence de la température sur la viscosité est illustrée dans la figure [26].

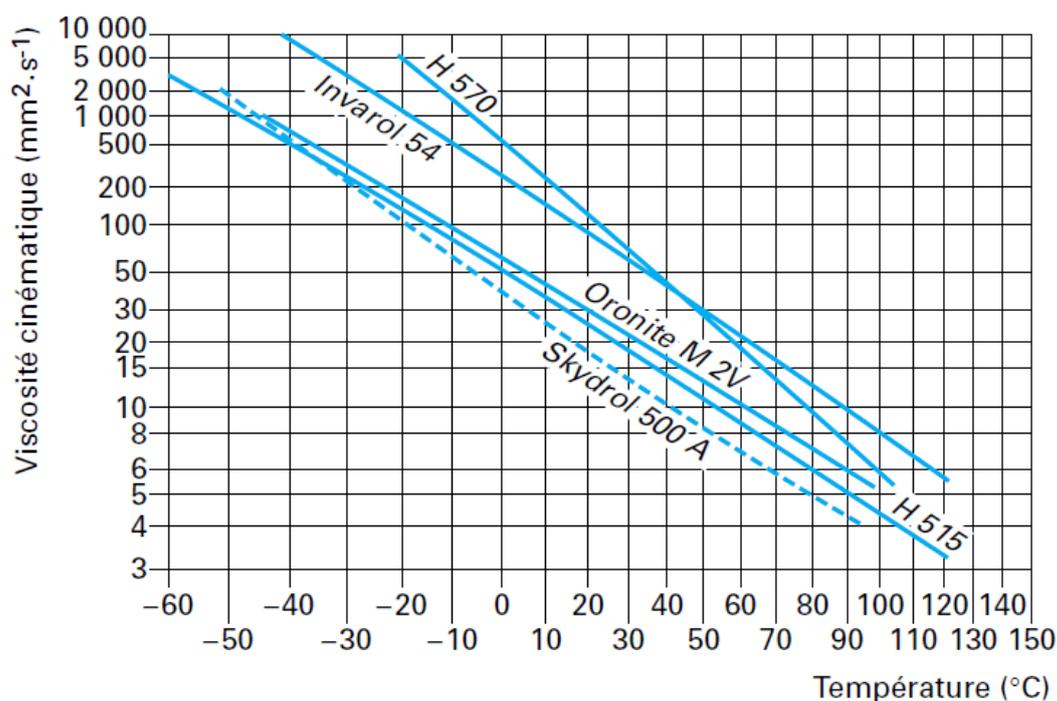


Figure V.3 : Variation de la viscosité en fonction de la température

#### V.5.2.4. Influence de la pression sur la viscosité

A température constante, la viscosité  $\eta$  varie proportionnellement à la pression  $P$  suivant la loi exponentielle suivante :

$$\eta_p = \eta_0 a^{(P/P_0 - 1)}$$

Avec,

$\eta_p$  : Viscosité dynamique à la pression absolue.

$\eta_0$  : Viscosité dynamique à la pression atmosphérique.

$a$  : Coefficient qui varie avec la température.

Barus a développé l'approche suivante :

$$\eta_p = \eta_0 \exp[\alpha(P - P_0)]$$

Avec,  $\alpha$  : Coefficient de piézo-viscosité (viscosité- pression) exprimé en  $m^2/N$ .

Le coefficient  $\alpha$  est généralement obtenu en traçant le diagramme du logarithme népérien de la viscosité dynamique en fonction de la pression, ainsi  $\alpha$  représente la pente du graphe.

$$\alpha = d(\ln \eta) / dP$$

$\alpha$  est inversement proportionnel à la température, il varie principalement selon la topologie moléculaire du fluide hydraulique, sa géométrie ainsi que sa structure électronique.

Dans le cas où la pression du fluide est supérieure à 500 MPa, l'utilisation de la loi de Barus peut induire en erreur, il est donc préférable de faire appel à la formule proposée par Chu et Cameron exprimée de la manière suivante :

$$\eta_p = \eta_0 [(1 + C)p]^n$$

Les constantes  $C$  et  $n$  varient d'un fluide hydraulique à un autre en fonction de sa structure moléculaire, ses caractéristiques physiques, sa rigidité...etc.

## V.6. Conclusion

Pour que le fluide hydraulique puisse transmettre de l'énergie fournie par une pompe aux autres organes, il doit présenter certaines caractéristiques assurant un rendement optimum. Ces caractéristiques peuvent être : l'incompressibilité, le pouvoir de lubrification, la résistance à la corrosion ...etc. Pour qu'une huile soit efficace, elle doit conserver au maximum ses propriétés et ce pour éviter toute détérioration pouvant avoir un impact négatif sur les équipements utilisés.

Pour préserver la qualité de l'huile, il est important de l'analyser régulièrement, éviter les températures excessives, utiliser des joints compatibles avec le fluide de service et respecter la filtration imposée par le fabricant. D'autre part, l'étude de l'influence de la viscosité sur l'huile est primordiale. Il est recommandé d'évaluer la viscosité à différentes températures et tracer par la suite une courbe pour pouvoir visualiser la dégradation de l'huile.

---

**CHAPITRE VI : ANALYSE DES FLUIDES**

**HYDRAULIQUES : HUILE DE L'ACCUMULATEUR**

**ETUDIE**

---

## Chapitre VI : Analyse des fluides hydrauliques : Huile de l'accumulateur étudié

### VI.1. Introduction

Dans le but d'augmenter la durée de vie des diverses composantes du système hydraulique, il est nécessaire de déterminer les facteurs influençant le fluide hydraulique qui y circule, et ce en effectuant les analyse adéquates permettant d'en déterminer la qualité.

Le présent chapitre, on présentera les différentes méthodes permettant de déterminer ces facteurs.

### VI.2. Théorie des méthodes de mesure

Dans ce qui suit, on explicitera les différentes méthodes d'analyses des deux propriétés essentielles à la mise en place de la simulation, à savoir : la masse volumique et la viscosité.

#### VI.2.1. La masse volumique

Cette grandeur représente la masse de l'unité de volume d'un fluide donnée. Elle est mesurée expérimentalement à une température de référence de 15°C [30].

Plusieurs méthodes servent à déterminer la masse volumique, à savoir :

##### VI.2.1.1. Mesure à l'aéromètre

Est un appareil gradué fait en verre ou en métal permettant de déterminer la masse volumique de l'échantillon (figure VI.1) et dont le fonctionnement se fonde sur le principe d'Archimède. L'appareil est plongé dans le fluide jouant ainsi le rôle d'un corps flottant subissant d'une part la force du poids  $P$  du corps de l'appareil, exercée en son centre de gravité, et d'autre part la poussée d'Archimède, dirigée de bas en haut et exercée en son centre de poussée [28].

Ces deux forces se stabilisent à un moment, un équilibre a lieu alors. Afin que ce dernier soit stable, le centre de poussée doit se situer au-dessus du centre de gravité, ainsi un lest est placé très bas et est surmonté d'un renflement afin d'abaisser le centre de gravité et élever le centre de poussée [29] [30].

Ce niveau d'équilibre indique alors la masse volumique du fluide sur l'échelle étalonnée.

Cet instrument existe sous deux (2) formes [28] [30] [29] :

- Aréomètre à volume constant : dans ce cas, le poids de l'appareil est changé en ajoutant ou retirant des masses sur un plateau le surmontant, et ce dans le but d'équilibrer le volume de liquide immergé.

- Aréomètre à poids constant : dans ce type d'appareil, le volume immergé est mesuré grâce à une tige graduée de faible section. Plus la tige est fine, plus l'appareil est sensible donnant ainsi des résultats précis.

Ces appareils sont gradués à une température déterminée. S'ils sont employés à une autre température, des corrections seront alors apportées à la température par l'utilisation de tables [28].

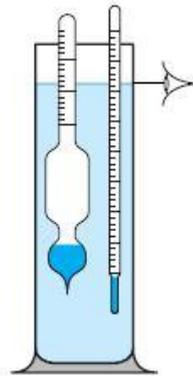


Figure VI.1 : Mesure à l'aréomètre

#### VI.2.1.2. Mesure au pycnomètre

Est un bécher en verre gradué de volume défini, et dont le principe de fonctionnement est simple. Il est pesé une première fois sans l'échantillon ( $m_1$ ) puis repesé en contenant le fluide étudié ( $m_2$ ). La différence entre ces deux (2) masses divisée par le volume du bécher donne la masse volumique de l'échantillon [30].

Sa schématisation est représentée dans la figure suivante.

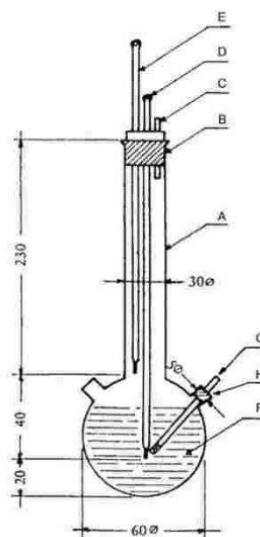


Figure VI.2 : Mesure au pycnomètre

Deux (2) types de pycnomètre existent :

- Pycnomètre métallique : Leur principe de fonctionnement est similaire à celui du pycnomètre ordinaire. La seule différence réside dans la capacité qu'il peut atteindre et qui varie de 50 à 100  $cm^3$ . Il est constitué d'une cuve et d'un couvercle muni d'un orifice d'écoulement du trop-plein [29].
- Pycnomètre à gaz : Ce type d'appareil permet de déterminer de façon précise le volume d'un échantillon solide massif ou poreux (car le gaz pénètre dans les cavités). Son fonctionnement consiste à injecter un gaz à une pression donnée dans une enceinte de référence, puis à détendre ce gaz dans l'enceinte contenant l'échantillon étudié et mesurer alors sa nouvelle pression. Par application de la loi de Mariotte [29] [31] :

$$P_1 * V_1 = P_2 * (V_0 + V_1 - V_E)$$

La relation suivante est établie :

$$V_E = V_0 - V_1 \left( \frac{P_1}{P_2} - 1 \right)$$

Avec,

$V_1$ : Volume de l'enceinte de référence ;

$V_0$ : Volume de l'enceinte de mesure ;

$V_E$ : Volume de l'échantillon ;

$P_1$ : La pression du gaz dans l'enceinte de référence ;

$P_2$  : La pression du gaz après détente dans l'enceinte de mesure.

### VI.2.1.3. Mesure au densimètre digital

Le principe de fonctionnement de ce type d'appareil est basé sur la mesure de la période d'oscillation harmonique d'un tube en « U » contenant l'échantillon étudié. La masse volumique est alors déterminée à partir de la période d'oscillation, et ce par application de la relation suivante [30] :

$$\rho = A(P^2 - B)$$

Avec, A et B deux constantes de l'appareil, dépendant de la température et de la pression et

$P$  : période de l'oscillation.

Ainsi, pour déterminer la valeur de la masse volumique  $\rho$ , il suffit de déterminer la valeur des constantes A et B et ce en injectant deux substances étalons (l'air et l'eau) dans la cellule de mesure. Les valeurs de ces constantes sont données automatiquement par l'appareil.

Différents modèles de densimètres digitaux existent, parmi lesquels : paillasse, module, portable, passeurs d'échantillon... [30].

## VI.2.2. La viscosité

La viscosité dynamique représente la résistance à l'écoulement laminaire d'un fluide incompressible, dans le cas présent : l'huile.

Elle peut être évaluée à travers différentes méthodes présentées dans ce qui suit.

### VI.2.2.1. Viscosité dynamique

- Le viscosimètre de Couette : est un viscosimètre composé de deux (2) cylindres coaxiaux, comme présenté dans la figure ci-dessous, dont l'intervalle entre eux sert à recevoir le fluide d'étude. Un couple de torsion constant est ensuite appliqué mettant en mouvement un des cylindres (le roto) pendant que l'autre est inerte (stator). La détermination du couple résistant à ce mouvement (M), ainsi que la constante de l'appareil K permettra de déterminer la valeur de la viscosité, qui est donnée alors, pour les fluides Newtoniens, par la formule suivante :

$$\eta = M \left[ \frac{1}{(r_r^2 + r_s^2)} \right] * [4 * \pi * l * \omega]^{-1} = k * M * \omega^{-1}$$

Avec,

$\omega$  : vitesse angulaire ;

$k$  : Constante du viscosimètre dépendant du dimensionnement de chaque paire de cylindres coaxiaux.

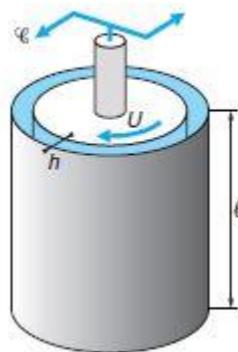


Figure VI.3 : Viscosimètre de Couette

- Viscosimètre cône sur plan : dans ce type de viscosimètre, le plan fixe supporte une surface conique en rotation, placée perpendiculairement, tel que l'intervalle entre le cône et le plan est rempli de fluide. L'angle de cône permet de respecter, dans l'espace libre, un gradient de cisaillement constant à une vitesse de rotation constante et donnée, avec une température régulée à une valeur désirée [30].

La viscosité est alors donnée, pour les fluides Newtoniens, par la formule ci-dessous :

$$\eta = 3.M.\alpha.\cos^2\alpha.\left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right).(2.\pi.\omega.r^3)^{-1} = k.M.\omega^{-1}$$

Avec,

$r$  : Rayon du cône ;

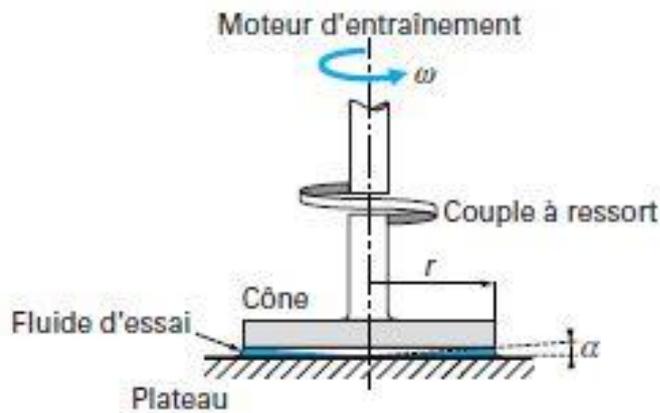
$M$  : Couple résistant au frottement visqueux de l'échantillon d'huile ;

$\omega$  : Vitesse angulaire ;

$\alpha$  : Angle du cône,

$k$  : Constante du viscosimètre dépendant du dimensionnement du cône ( $r$  et  $\alpha$ ).

La figure ci-dessous présente la schématisation de ce viscosimètre.



**Figure VI.4 : Viscosimètre Cône sur plan**

- Viscosimètre à chute libre : Le principe de fonctionnement de ce viscosimètre consiste à mesurer le temps nécessaire à une bille d'acier pour se déplacer d'un point à un autre, et ce à l'intérieur d'un tube en verre et sous l'action de la pesanteur, comme représenté dans la figure VI.5. Une fois les paramètres déterminés, [30] [32] la formule suivante permettra alors de calculer la viscosité :

$$\eta = 2.r^2.(\rho_b - \rho_f).g.k.(9.v)^{-1}$$

Tels que :

$r$  : Rayon de la bille ;

$\rho_b$  : Masse volumique de la bille ;

$\rho_f$  : Masse volumique du fluide ;

$g$  : Accélération due à la pesanteur ;

$k$  : Constante dépendant du dimensionnement du viscosimètre ;

$v$  : Vitesse constante de déplacement (de chute) du corps dans un milieu homogène de viscosité et de masse volumique.

Avec,

$$k = 1 - 2,104 \left( \frac{d}{D} \right) + 2,09 \left( \frac{d}{D} \right)^3 - 0,9 \left( \frac{d}{D} \right)^5$$

Où,  $d$  : Diamètre de la bille et  $D$  : Diamètre interne du tube en verre.

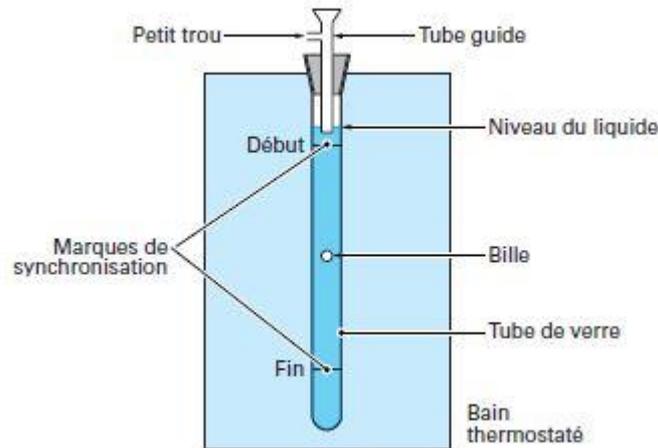


Figure VI.5 : Viscosimètre à chute libre

#### VI.2.2.2. Viscosité cinématique

- Viscosimètre capillaire : Ce type de viscosimètre sert à déterminer la viscosité des fluides Newtonien à écoulement laminaire. Il existe plusieurs types de viscosimètres capillaires mais les plus communs sont : Ostwald, Cannon- Fenske, Ubbelohde. Tous trois (3) possèdent le même principe de fonctionnement, c'est-à-dire mesurer le temps d'écoulement ( $t$ ) d'un volume déterminé de fluide à travers deux (2) repères fixes d'un tube capillaire de diamètre et de longueur connus, comme illustré dans la figure ci-dessous. [30] [33]

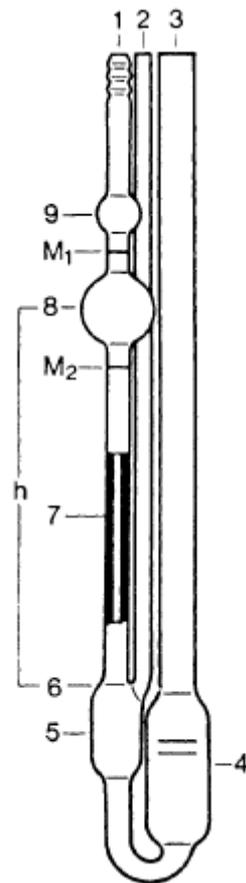
Le diamètre du tube capillaire est à choisir de telle sorte que l'incertitude inhérente à la correction d'énergie cinétique ne dépasse pas les erreurs admises pour le chronométrage.

Ce viscosimètre repose sur la loi de poiseuille de manière à ce que la viscosité dynamique soit proportionnelle à la durée de l'écoulement à travers une constante  $k$ , exprimée par [30]:

$$\eta = k \cdot \rho \cdot t$$

Avec,

- $k$  : Constante d'étalonnage,
- $\rho$  : Masse volumique,
- $t$  : Durée d'écoulement.



- 1) Tube capillaire.
- 2) Tube de ventilation.
- 3) Tube de remplissage.
- 4) Réservoir.
- 5) Récipient de détente.
- 6) Calotte sphérique.
- 7) Tube capillaire.
- 8) Boule de mesure.
- 9) Boule d'entrée.

$M_1$  Marque annulaire supérieure.

$M_2$  Marque annulaire inférieure.

Figure VI.6 : Viscosimètre capillaire d'Ostwald

### VI.3. Mesures des caractéristiques de l'huile utilisé dans l'accumulateur d'étude

Du fait de l'importance de la fonction assurée par l'huile hydraulique dans l'accumulateur, il est impératif d'en garantir les performances nécessaires et effectuer régulièrement les contrôles adéquats sur sa qualité, il est également utile de s'en remettre aux conseils et recommandations des fabricants. En effet, un service efficace nécessite une huile ayant les caractéristiques requises pour l'équipement dans lequel elle sera mise en œuvre.

La facilité du prélèvement d'un échantillon d'huile sans devoir arrêter la machine s'avère être un moyen recommandé pour les inspections périodiques. L'analyse d'un échantillon d'huile dévoile des informations liées à sa dégradation pouvant servir à la mise en place des mesures correctives.

Dans la présente partie, on va exposer les résultats des essais réalisés sur des échantillons d'huile hydraulique utilisés plus tard dans la simulation de l'écoulement au sein des accumulateurs. Ces essais ont été réalisés au laboratoire des Phénomènes de Transfert de l'USTHB

### **VI.3.1. Propriétés à analyser**

Quand on procède à l'analyse d'un échantillon d'huile industrielle, différentes caractéristiques peuvent être mises en exergue. Dans notre cas, les caractéristiques soumises à l'examen sont celles qui nous permettent de déterminer la cause principale de l'éclatement de la vessie.

Les caractéristiques analysées sont la viscosité à différentes températures, la masse volumique et le degré d'acidité du fluide. La couleur et l'aspect de l'huile peuvent également fournir des informations utiles, une couleur sombre à titre d'exemple indique généralement que le processus de la dégradation de l'huile a déjà été entamé [34].

#### **VI.3.1.1. Viscosité**

Nous avons déterminé la viscosité de l'huile hydraulique à travers l'utilisation d'un viscosimètre capillaire d'Ostwald au niveau du laboratoire de l'USTHB. Par manque de matériels, nous n'avons pas pu établir la valeur de la viscosité par d'autres appareils afin d'établir une analyse comparative des résultats obtenus. Néanmoins, l'analyse des résultats fournis par GE a pu faire fi de base de comparaison [20].

- Principe de fonctionnement

Avant le premier usage, il est important de nettoyer le viscosimètre à 15 % de  $H_2O_2$  et 15 %  $HCl$ , pour ensuite le rincer avec un solvant approprié. Il doit être parfaitement sec et exempt de poussière ou autres résidus.

Le remplissage de l'appareil s'effectue avec 15 ml d'un liquide préalablement filtré, par la suite, le viscosimètre est accroché à son support pour éviter tout mouvement. Lors de la manipulation, le thermostat doit maintenir une température constante car des différences de température de 0,1 °C peuvent entraîner, pour les huiles minérales, une erreur de 0,6 %.

Dans ces viscosimètres, la contrainte de cisaillement est liée au glissement du liquide entraîné par sa propre masse, la couche limite du fluide en contact avec la paroi est alors supposé immobile.

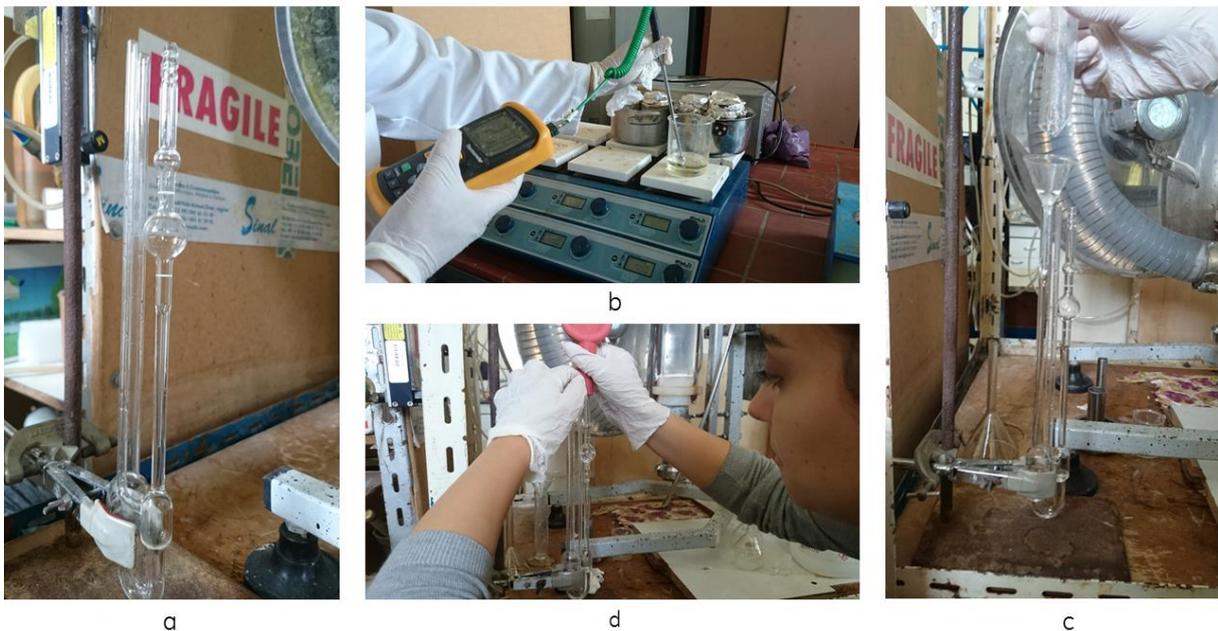
Après remplissage, le temps mis par un volume de liquide pour s'écouler entre les deux repères définis du capillaire est mesurée [34]. Cette mesure peut être :

- manuellement : le chronomètre est déclenché et arrêté par observations visuelles ;
- automatiquement : le chronomètre est déclenché et arrêté par un système optique de faisceaux lumineux.

- Manipulation :

Lors de notre manipulation, nous avons suivi les étapes ci-dessous :

- Nettoyer soigneusement le viscosimètre avec de l'alcool ou de l'eau distillée ;
- Mettre le viscosimètre dans un bain thermostatique afin de maintenir la température désirée et parer à l'effet de la température ambiante du laboratoire ;
- Verser à travers le tube capillaire (3) 15 ml d'huile ;
- Attendre 5 à 10 mn que l'équilibre thermique soit établi, puis vérifier le niveau au trait (4) ;
- Aspirer l'huile à l'aide d'une propipette jusqu'au-dessus du repère ;
- Enlever la propipette ;
- Laisser l'huile descendre et déclencher le chrono entre le repère  $M_1$  et  $M_2$  ;
- Pendant les mesures, apprécier l'incertitude sur la mesure du temps d'écoulement  $t$  de façon à déterminer la précision avec laquelle les valeurs de la viscosité sont connues ;
- Répéter les essais pour confirmer les résultats.



**Photo VI.1. Essai de viscosité par viscosimètre capillaire d'Ostwald**

- Evaluation de la viscosité

Le nombre de secondes indiqué pour les divers tubes capillaires dans les tableaux de corrections d'énergie cinétique est à déduire à partir de la durée de passage déterminée. Les valeurs intermédiaires peuvent être interpolées.

Dans le cas de mesures absolues, le temps de passage corrigé donne directement la viscosité cinématique [ $mm^2/s$ ] en le multipliant par la constante  $K$  [20] [34].

$$m = K (t - \gamma)$$

La constante  $K$  du viscosimètre est indiquée dans le certificat d'étalonnage du fabricant.

**Tableau VI.1 : (a) et (b) : Tableaux de correction de l'énergie cinétique**

(a)

Référence	Tube capillaire	Diamètre du tube (mm)	Constante K	Limites de mesures ( $mm^2/s$ )
...00	0	0,36	0,001	0,2 – 1,2
...03	0 <sub>c</sub>	0,46	0,003	0,5 – 3,0
...01	0 <sub>a</sub>	0,53	0,005	0,8 – 5,0
...10	I	0,63	0,010	1,2 – 10
...13	I <sub>c</sub>	0,84	0,030	3,0 – 30
...11	I <sub>a</sub>	0,95	0,050	5 – 50
...20	II	1,13	0,100	10 – 100
...23	II <sub>c</sub>	1,50	0,300	30 - 300
...21	II <sub>a</sub>	1,69	0,500	50 – 500
...30	III	2,01	1,000	100 – 1000
...33	III <sub>c</sub>	2,65	3,000	300 – 3000
...21	III <sub>a</sub>	3,00	5,000	500 – 5000
...40	IV	3,60	10,000	1000 – 10000
...43	IV <sub>c</sub>	4,70	30,000	3000 – 30000
...41	IV <sub>a</sub>	5,34	50,000	Plus que 10000
...50	V	6,40	100,000	Plus que 10000

(b)

Temps de passage (s)	Tube capillaire I	Tube capillaire $I_c$	Tube capillaire $I_a$	Tube capillaire II
40	1,03	0,45	0,15	
50	3,96	0,66	0,29	0,10
60	2,75	0,46	0,20	0,07
70	2,02	0,34	0,15	0,05
80	1,55	0,26	0,11	0,04
90	1,22	0,20	0,09	0,03
100	0,99	0,17	0,07	0,02
2,53	0,82	0,14	0,06	0,02
2,13	0,69	0,12	0,05	0,02
1,81	0,59	0,10	0,04	0,01
1,56	0,51	0,08	0,04	0,01
1,36	0,44	0,07	0,03	0,01
160	0,39	0,06	0,03	0,01
170	0,34	0,06	0,02	0,01
180	0,30	0,05	0,02	0,01
190	0,28	0,05	0,02	0,01
200	0,25	0,04	0,02	0,01
225	0,20	0,03	0,01	0,01
250	0,16	0,03	0,01	<0,01
275	0,13	0,02	0,01	<0,01
300	0,11	0,02	0,01	<0,01
325	0,09	0,02	0,01	
350	0,08	0,01	0,01	
375	0,07	0,01	0,01	
400	0,06	0,01	<0,01	
425	0,05	0,01	<0,01	
450	0,05	0,01	<0,01	
475	0,04	0,01		
500	0,04	0,01		
550	0,03	0,01		
500	0,03	0,01		
650	0,03	>0,01		
700	0,02	>0,01		
750	0,02	>0,01		

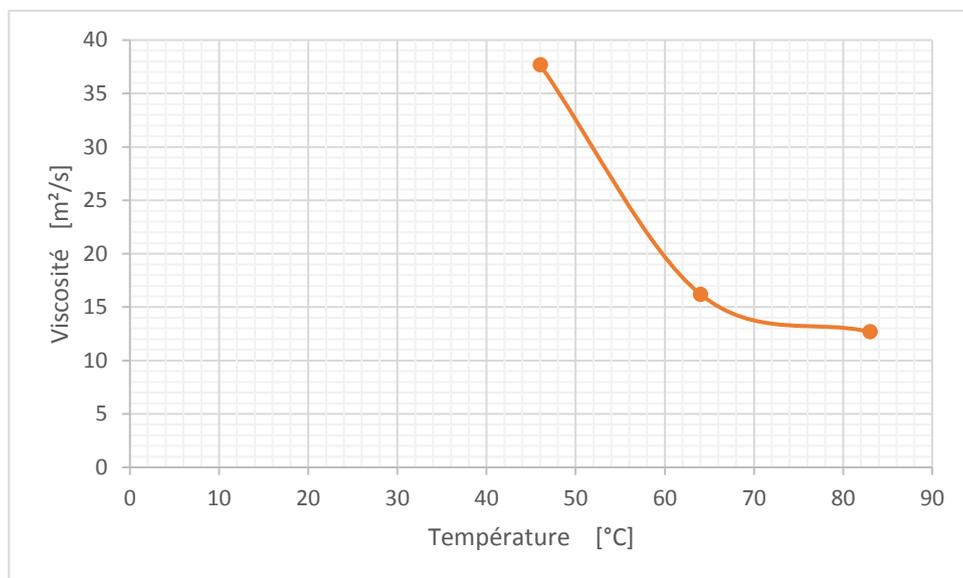
800	0,01			
850	0,01			
900	0,01			
950	0,01			
1000	0,01			

- Interprétation des résultats

Suite à nos essais, nous avons obtenus les résultats présentés dans les tableaux ci-dessous.

**Tableau VI.2 : Résultats des essais de viscosité sur l'huile de bonne qualité**

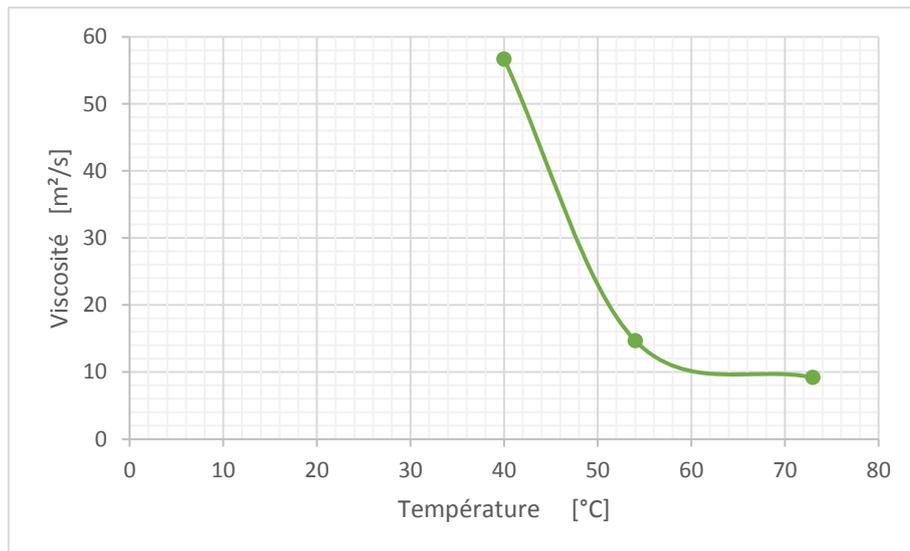
Température (°C)	Temps d'écoulement (s)	Viscosité ( $m^2/s$ )
40°C	567	56,7
54°C	147	14,7
73°C	92	9,2



**Figure VI.7 : Interprétation des essais de viscosité de l'huile de bonne qualité**

**Tableau VI.3 : Résultats des essais de viscosité de l'huile dégradée**

Température (°C)	Temps d'écoulement (s)	Viscosité ( $m^2/s$ )
46°C	377	37,7
64°C	162	16,2
83°C	127	12,7



**Figure VI.8 : Interprétation des essais de viscosité de l'huile dégradée**

### VI.3.1.2. Masse volumique

En ce qui concerne la masse volumique, nous avons établi sa valeur par l'utilisation du densimètre digital du laboratoire de l'USTHB. Vu l'absence de moyens, nous n'avons pas pu déterminer la valeur de cette propriété par les autres types d'appareils afin de la confirmer. Par contre, comme pour l'estimation de la viscosité, les résultats d'analyse fournis par GE nous ont permis de comparer nos résultats aux leurs [20].

- Principe de fonctionnement

Comme explicité dans la partie précédente, le fonctionnement de cet appareil repose sur la période d'oscillation harmonique d'un tube en « U » contenant l'échantillon étudié. De même que le viscosimètre, ainsi que tout autre appareil, le densimètre doit être nettoyé avant son usage avec de l'alcool puis de l'eau distillée.

Une fois le nettoyage effectué, nous avons suivi les étapes ci-dessous :

- Sélectionner le paramètre à déterminer, dans notre cas il s'agit de la masse volumique ;
- Maintenir le bouton d'aspiration comprimé puis introduire le tube du densimètre à l'intérieur de l'échantillon d'huile ;
- Une fois l'échantillon aspiré, les résultats apparaissent sur l'écran du densimètre ;
- Vider le tube dans un récipient en appuyant de nouveau sur le bouton d'aspiration ;
- Répéter les essais pour confirmer les résultats.

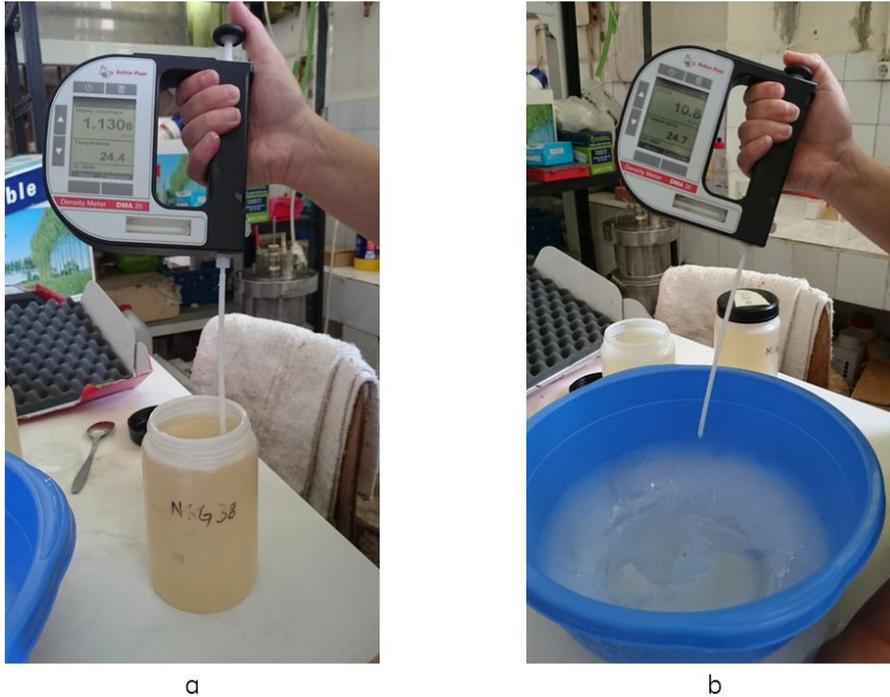


Photo VI.2. Essai de masse volumique au densimètre digital

- Interprétation des résultats

Les résultats obtenus lors de nos essais sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI.4 : Résultats des essais de masse volumique au densimètre digital

Huile	Température (°C)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%)	pH à (25 °C)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )
Usée	24,5	19,1	3,30	1130,75
Nouvelle	24,3	19,2	3,54	1130,25

#### VI.4. Conclusion

Afin de déterminer la qualité de l'huile circulant dans le système hydraulique, on a effectué des essais permettant d'en évaluer les caractéristiques, à savoir la masse volumique et la viscosité. Ces paramètres seront utilisés par la suite afin de réaliser une simulation représentant l'écoulement et son impact sur le système étudié.

Les résultats obtenus démontrent clairement une différence entre l'huile hydraulique ayant déjà servi et celle nouvellement introduite, telles que la viscosité de la première (déterminée à plusieurs températures) est quasiment plus importante que celle de la deuxième. Ce qui est tout à fait logique, vu que la viscosité de l'huile diminue lors de son utilisation.

---

## **CHAPITRE VII : SIMULATION**

---

## Chapitre VII : Simulation

### VII.1. Introduction

En ingénierie, *la simulation* est un outil efficace et économique fréquemment utilisé pour faire des études préliminaires permettant d'analyser le comportement d'un système avant de l'implémenter.

Elle permet de perfectionner son fonctionnement à travers les différentes corrections et améliorations, et consiste à étudier le comportement d'un système en s'appuyant sur l'élaboration d'un modèle mathématique, réaliser plusieurs scénarios et en déduire ainsi le comportement du système analysé.

Le modèle permet de prédire et d'anticiper les événements en facilitant l'attribution des différentes probabilités aux différents événements. Partant de ce fait, des hypothèses peuvent être formulées et les modes d'opération de l'objet en question modifiés en fonction des cas étudiés.

Le modèle ne peut pas être considéré comme un outil explicatif, en revanche, il joue un rôle important dans la formulation des différentes hypothèses et théories de fonctionnement, de plus, Il doit toujours être plus simple que l'objet ou le processus qu'il représente.

### VII.2. Principe de fonctionnement et rôle des simulations

Les simulations de procédés telles qu'elles sont employées dans l'industrie, sont perçues comme des modèles de connaissance. Ils sont basés sur la résolution de bilans de masse et d'énergie, des équations d'équilibres thermodynamiques...etc.

Ces modèles sont aptes à fournir l'information qui facilitera la conception et sont généralement employés pour concevoir de nouveaux objets (analyse de fonctionnement d'un objet dans différentes conditions d'opération, optimisation, dimensionnement des appareils...), mais aussi optimiser les procédés existants et évaluer les changements effectués sur les modalités opératoires.

Les simulateurs disposent d'une base de données thermodynamiques comprenant les différentes propriétés des corps purs (température, masse molaire, paramètres des lois de tension de vapeur...). Cette base de données est régulièrement enrichie d'autres modèles offrant la possibilité d'estimer les propriétés des mélanges.

Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé deux (2) simulateurs. L'un pour le contrôle de la résistance de l'élément interne de l'accumulateur, à savoir la vessie, et l'autre pour le traitement de l'écoulement au sein de l'accumulateur dans son ensemble.

Pour le premier cas, l'utilisation de COMSOL nous a permis d'avoir les résultats nécessaires. Ensuite l'emploi de SolidWorks nous a fourni les informations utiles à la compréhension de l'écoulement.

### **VII.3. Aperçu sur les simulateurs**

#### **VII.3.1. COMSOL**

COMSOL Multiphysics est une plate-forme logicielle générale qui autorise la modélisation et la simulation des phénomènes physiques, et ce à l'aide de méthodes numériques avancées telle que la méthode des éléments finis. Il permet d'étudier des physiques "simples" ou encore des phénomènes multi-physiques. Sa première version est apparue en 1986, depuis des améliorations n'ont cessé d'y être apportées afin d'augmenter sa puissance et sa précision.

Pour étendre les simulations possibles, COMSOL Multiphysics comprend plus de trente (30) modules complémentaires qui offrent des interfaces et des outils spécialisés en génie électrique, mécanique, fluide et chimique. De plus, des interfaces bidirectionnelles relient les simulations réalisées dans COMSOL Multiphysics à des logiciels tiers de calcul ou de conception assistée par ordinateur tel que SolidWorks.

Il propose aussi un ensemble d'interfaces physiques de base, pour les domaines les plus courants comme l'analyse en mécanique, les écoulements en régime laminaire, l'acoustique, le transport des espèces diluées, l'électrostatique, les courants électriques, le transfert de chaleur et l'effet Joule. Ces interfaces sont des versions simplifiées de certaines des interfaces physiques proposées dans les modules complémentaires.

La définition d'équations permet de configurer intégralement, à partir d'un ensemble d'interfaces physiques, les simulations mathématiques ou physiques arbitraires qui ne présentent aucune option physique prédéfinie. Plusieurs modèles d'équation différentielle partielle (EDP) facilitent la modélisation des systèmes d'équations linéaires du second ordre ou non linéaires.

La définition d'équations auxiliaires permet également de modéliser des équations différentielles d'un ordre plus élevé. De plus, l'utilisation conjointe de ces outils basés sur les équations avec les physiques prédéfinies de ce logiciel, ou l'un de ses modules complémentaires, permet d'effectuer des analyses personnalisées ou de type couplage fort. Grâce à cette fonctionnalité, l'écriture de sous-programmes n'est que rarement nécessaire pour personnaliser les équations, les propriétés matériaux, les conditions aux limites ou les termes source.

COMSOL Multiphysics offre également un ensemble de modèles pour les EDP classiques : équation de Laplace, équation de Poisson, équation d'onde, équation de Helmholtz, équation de la chaleur et équation de type convection-diffusion [35].

### VII.3.2. SolidWorks

Le logiciel SolidWorks est une application de conception mécanique qui tire parti de l'interface utilisateur graphique de Microsoft Windows. Grâce à ce logiciel, les concepteurs peuvent esquisser rapidement une idée, expérimenter avec des fonctions et des côtes et produire des modèles et des mises en plan précis.

C'est un modelleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés. Il présente une large gamme de fonctions [36] :

- Les esquisses ;
- La modélisation volumique ;
- La modélisation surfacique ;
- La tôlerie ;
- L'assemblage ;
- L'animation ;
- Le rendu dans PhotoView 360.

Ce logiciel a été créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, il a été racheté par la suite par la société systèmes en 24 juin 1997. Il est composé de plusieurs modules parmi lesquels : le Flow simulation dont le calcul est basé sur les éléments finis, il utilise les fichiers pièces et assemblages auxquels il intègre des études dans lesquelles sont définis : les fluides, les paramètres à étudier, les conditions aux limites ainsi que les paramètres de maillage et d'analyse.

Ce dernier a été construit pour s'attaquer aux défis d'ingénierie, il permet aux ingénieurs de profiter de l'intégration de la CAO, des capacités avancées de maillage de la géométrie, de la puissance de la convergence de la solution, associé à une facilité d'utilisation surprenante. Les utilisateurs du Flow simulation peuvent simuler le débit, les champs d'écoulement, les processus de mélange et le transfert de chaleur, mais aussi les diverses chutes de pression... [37].

## VII.4. Application sur l'huile et la vessie de l'accumulateur étudié

### VII.4.1. Simulation de l'Écoulement de l'huile dans l'accumulateur via SolidWorks

La simulation sur Solidworks a pour principal objectif d'analyser l'écoulement de l'huile à l'intérieur de l'accumulateur lors de son entrée, et ce pour les deux types d'huile : Nouvelle et usée.

Cette simulation s'est faite en utilisant le module Flow Simulation. Ce dernier permet d'introduire les caractéristiques propres à l'huile du système hydraulique circulant dans le système. Ces caractéristiques ont été établies lors des essais présentés dans le chapitre précédent.

Afin d'arriver à la visualisation finale de la simulation, les étapes suivantes ont été respectées :

- Nous avons tout d'abord réalisé l'élément à étudier, à savoir l'accumulateur dans toute sa globalité. Pour ce faire, nous avons dessiné chaque partie le composant puis nous les avons assemblées. Ces parties sont : la vessie, le casing, le bouchon d'entrée de fluide, le bouchon d'attache de la vessie.

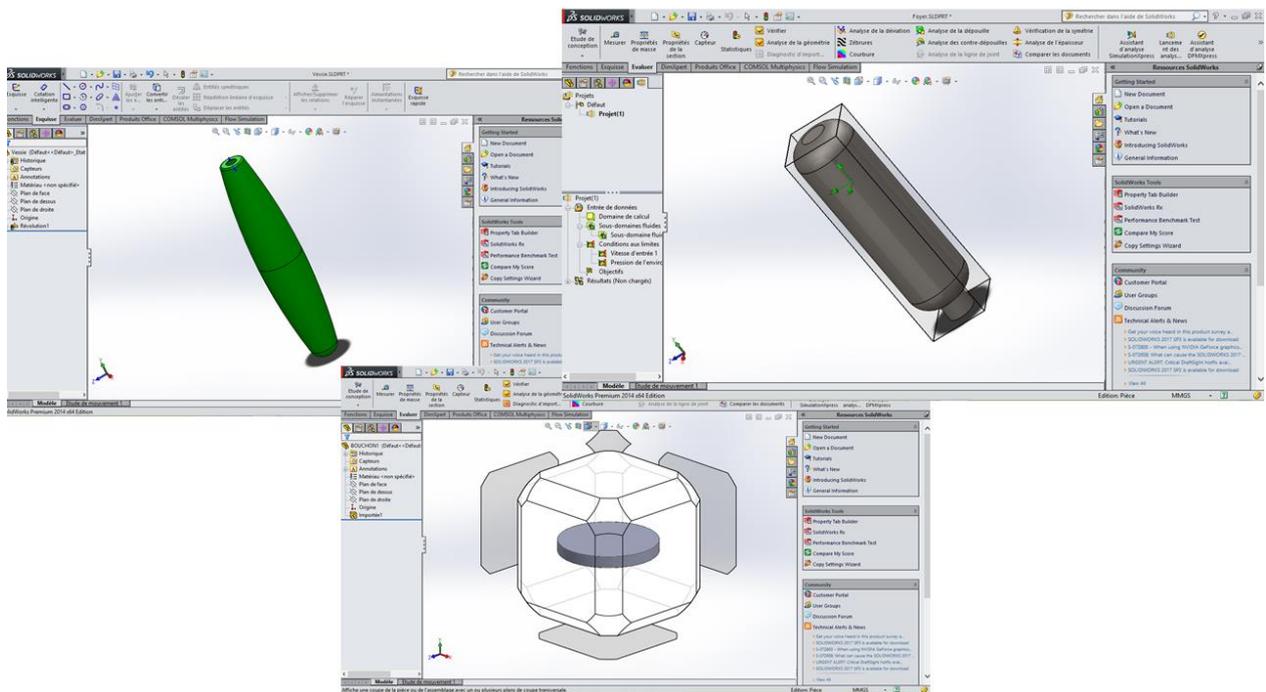
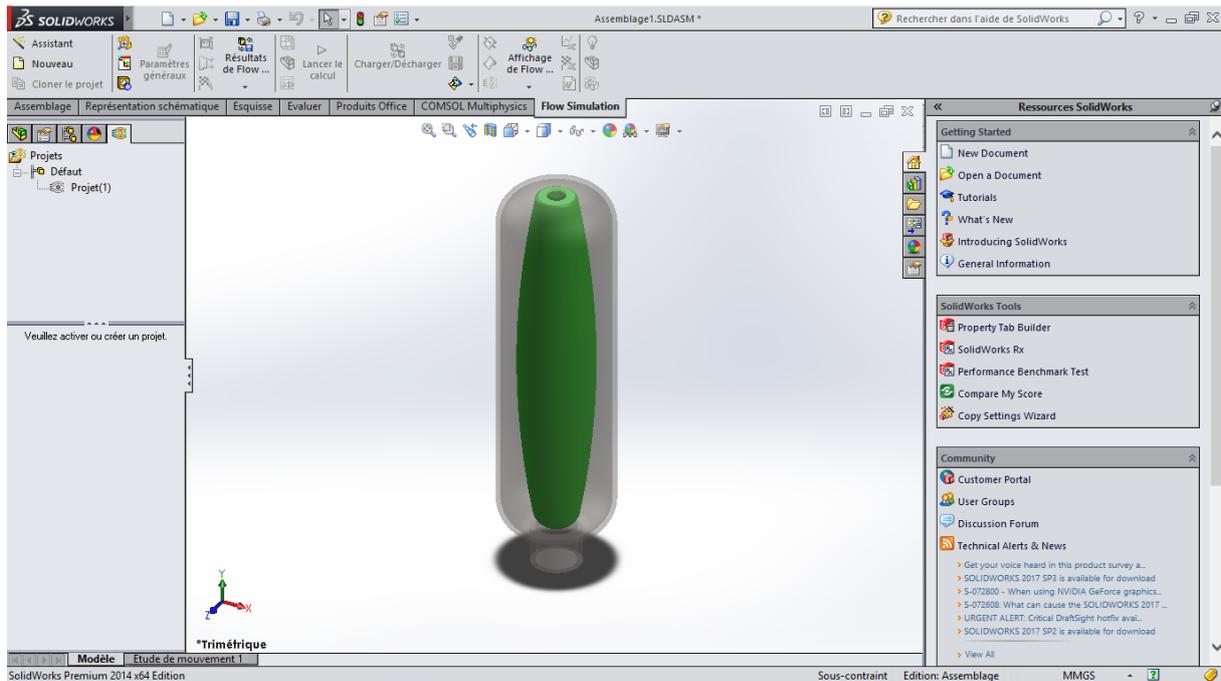


Photo VII.1. Esquisse de l'accumulateur

- Nous avons ensuite sélectionné le fichier à traiter, c'est-à-dire, l'assemblage résultant de la première étape afin de débiter la simulation.



**Photo VII.2. Sélection de l'assemblage pour la simulation**

- Nous avons ensuite ouvert l'assistant de Flow simulation. Une fois l'assistant sélectionné, une boîte de dialogue apparaît. Cette dernière aide l'utilisateur à choisir :
  - Le système d'unité : le Système International est le plus généralement utilisé ;
  - Le fluide circulant dans l'accumulateur : dans le cas de notre étude, nous avons introduit les propriétés de notre fluide de service (masse volumique, viscosité...) résultantes des essais présentés dans le précédent chapitre. En effet les propriétés propres aux deux (2) états de l'huile (dégradée et de bonne qualité) ont été enregistré afin d'être exploitées ;
  - Les paramètres régnant dans l'élément tels que la pression et la température. Au sein du système d'alimentation hydraulique, ces dernières sont respectivement de 130 bar (valeur maximale admise) et 46°C ;
  - Précision des calculs.

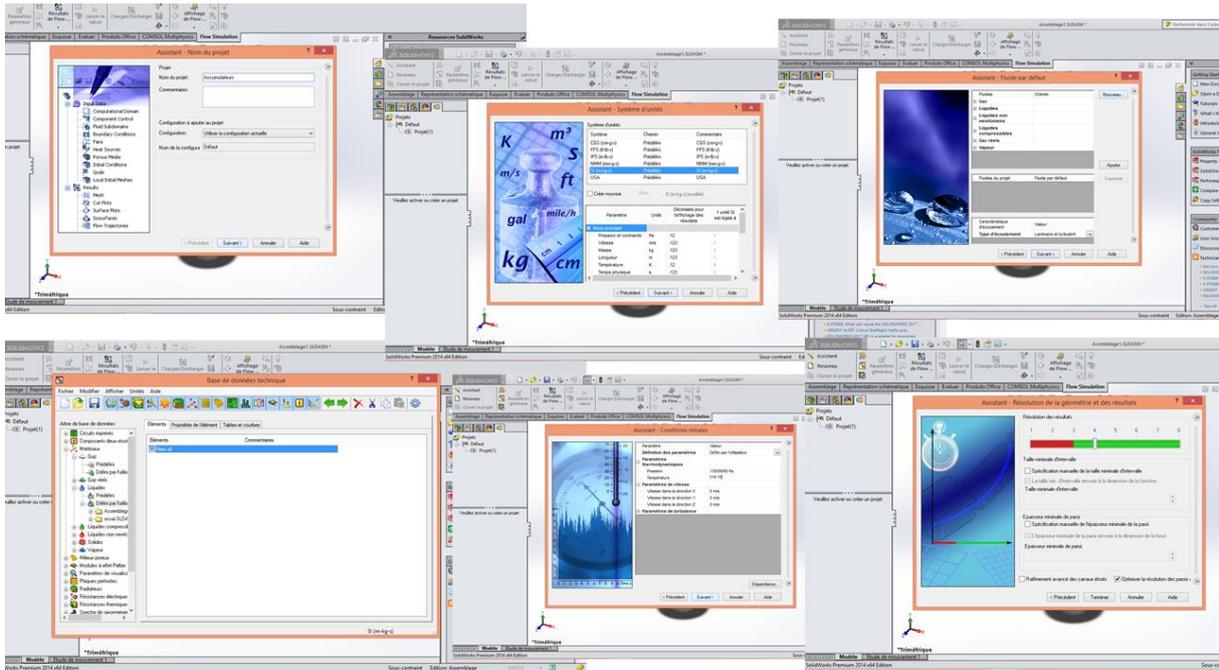


Photo VII.3. Introduction des paramètres de la simulation

- Suite à cela, nous avons inséré le sous domaine fluide, en sélectionnant les faces par lesquelles le fluide est conduit en précisant la valeur de la vitesse d'entrée, que nous avons calculé à partir du débit circulant dans le système ainsi que le diamètre de la tuyauterie alimentant l'accumulateur. Cette vitesse est de l'ordre de  $0,94 \text{ m/s}$  ;

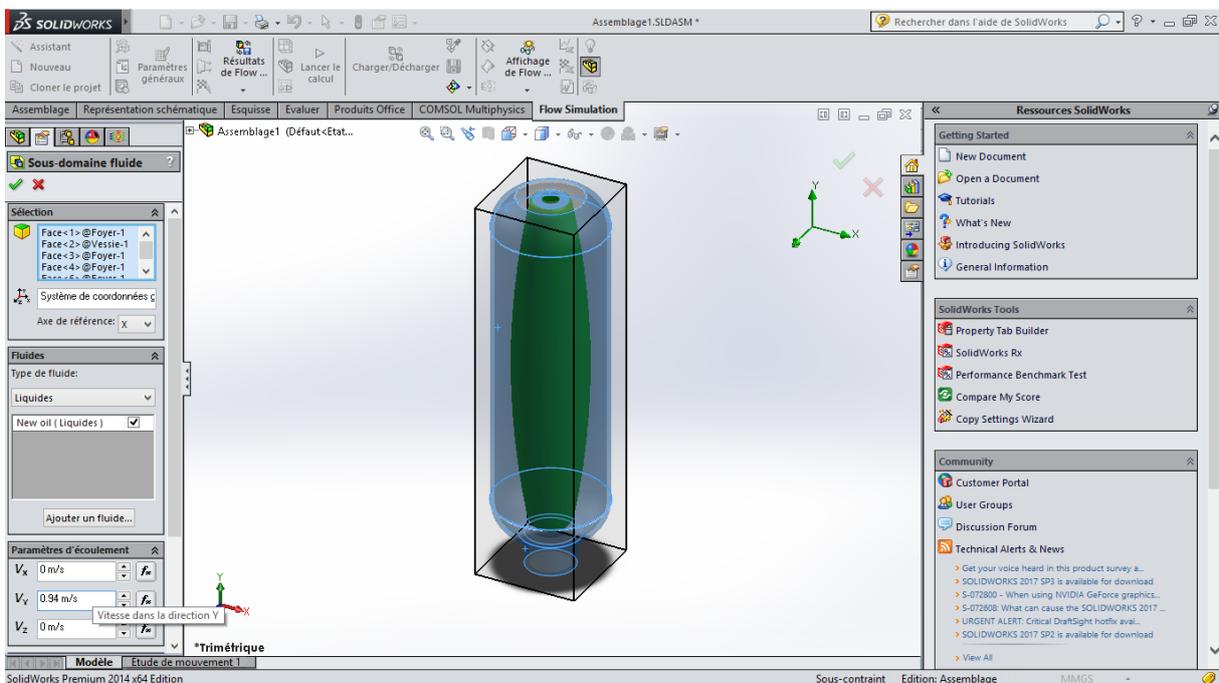


Photo VII.4. Sélection des faces concernées par la simulation

- Nous sélectionnons après cela les conditions aux limites : en choisissant l'orifice d'entrée de l'huile, et en y précisant la vitesse d'entrée et la pression ;

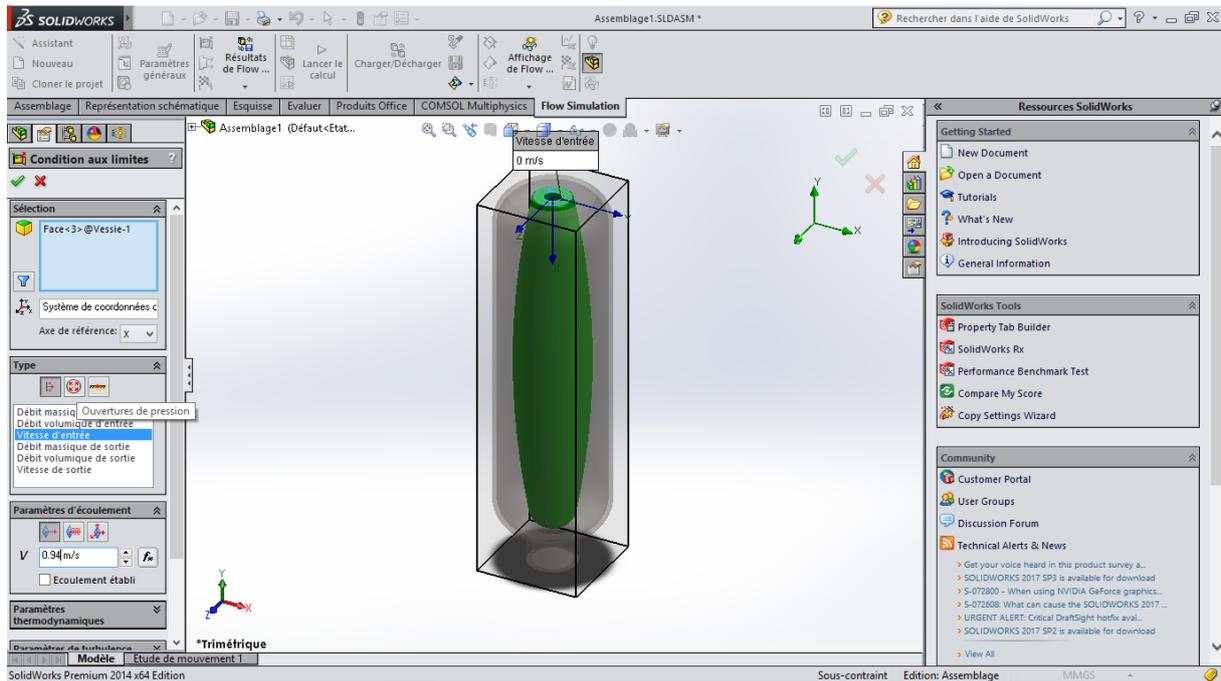


Photo VII.5. Introduction des conditions aux limites

- Une fois tous les paramètres nécessaires introduits, nous lançons le calcul.

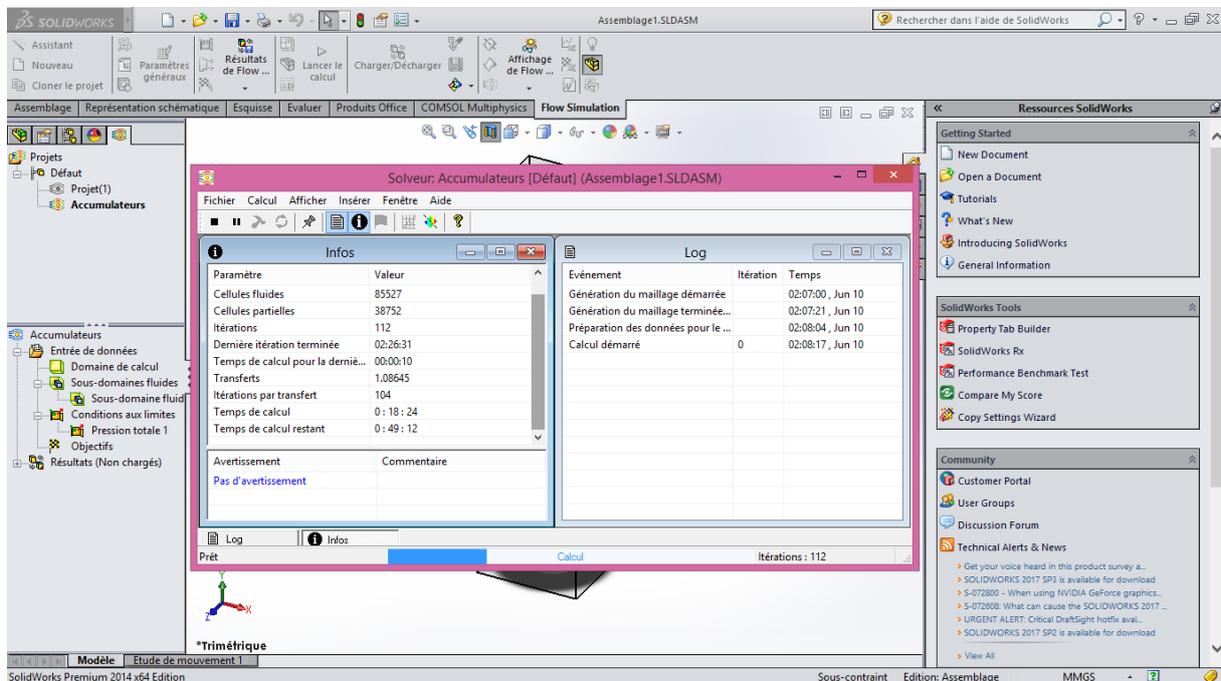
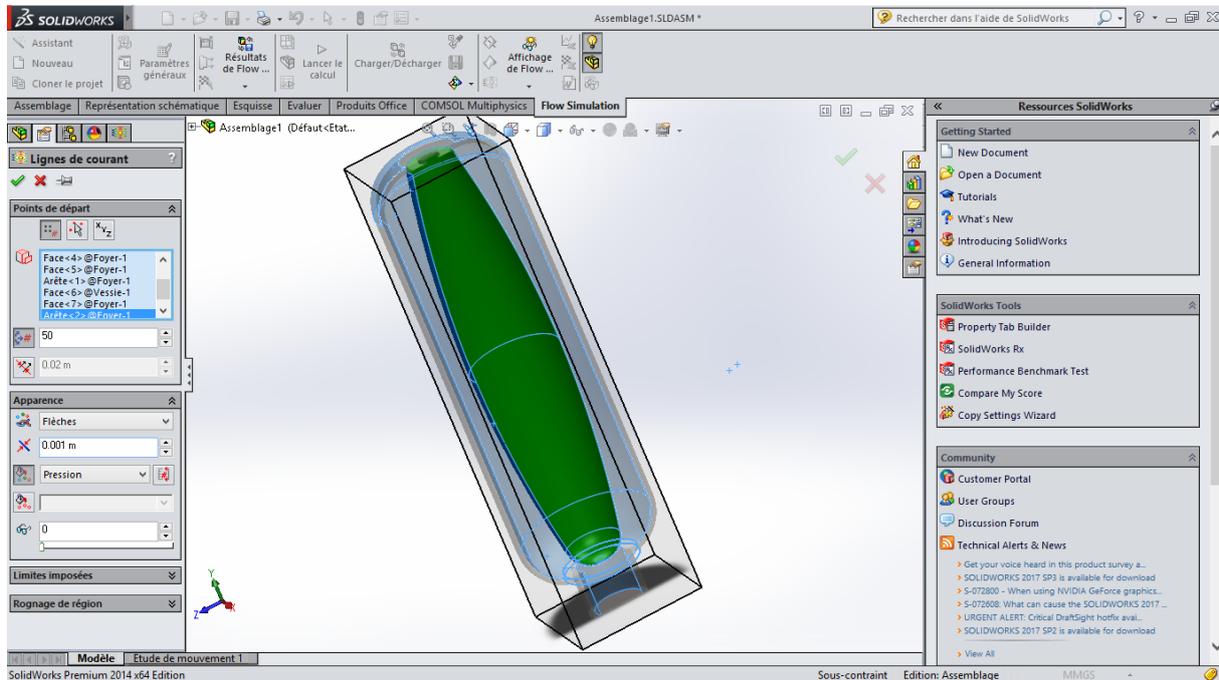


Photo VII.6. Lancement du calcul

- Afin d'afficher l'écoulement, nous avons tracé une coupe sur plan droit permettant de visualiser l'intérieur de l'accumulateur. Par la suite, nous sélectionnons les parois externes de la vessie ainsi que les parois interne du corps de l'accumulateur.



**Photo VII.7. Préparation des résultats**

- Nous introduisons alors les lignes de courant.

En vue d'établir une comparaison entre les caractéristiques de l'huile dégradée et celle en bon état, nous avons répété l'opération deux fois. Une première fois avec les propriétés de l'huile dégradée et une deuxième avec les propriétés de l'huile de bonne qualité en suivant dans les deux cas le même processus.

Les résultats des simulations sont représentés dans les figures suivantes.

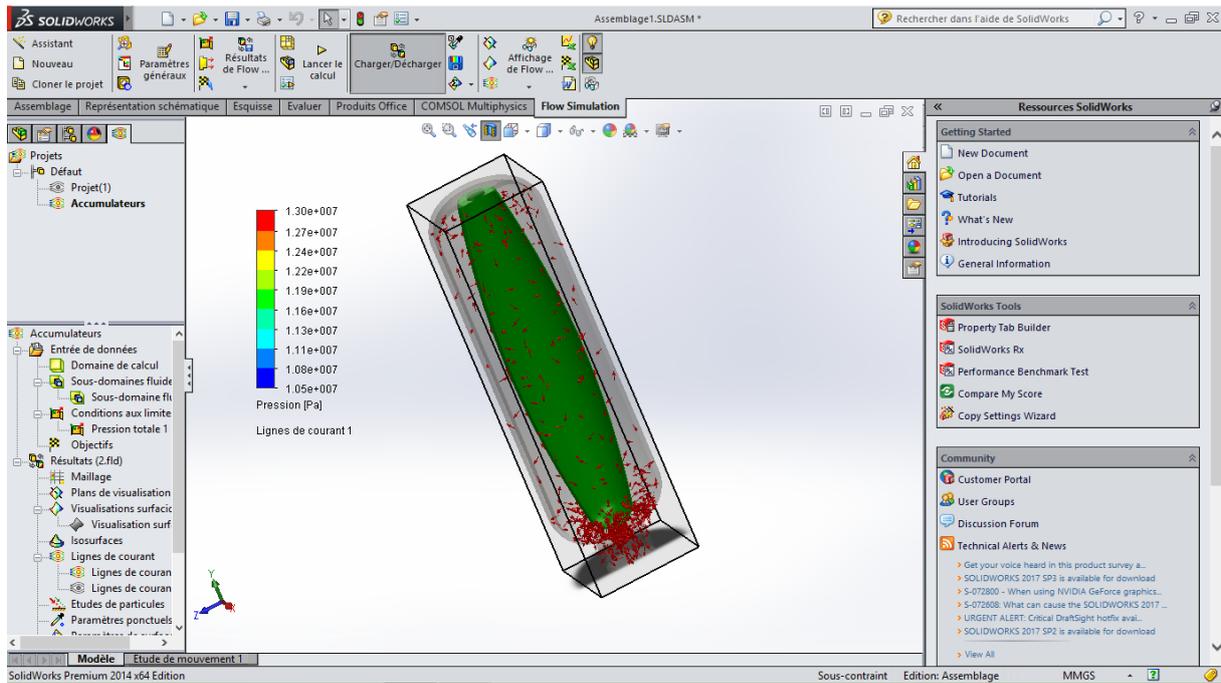


Figure VII.1 : Ecoulement de l'huile de bonne qualité dans l'accumulateur

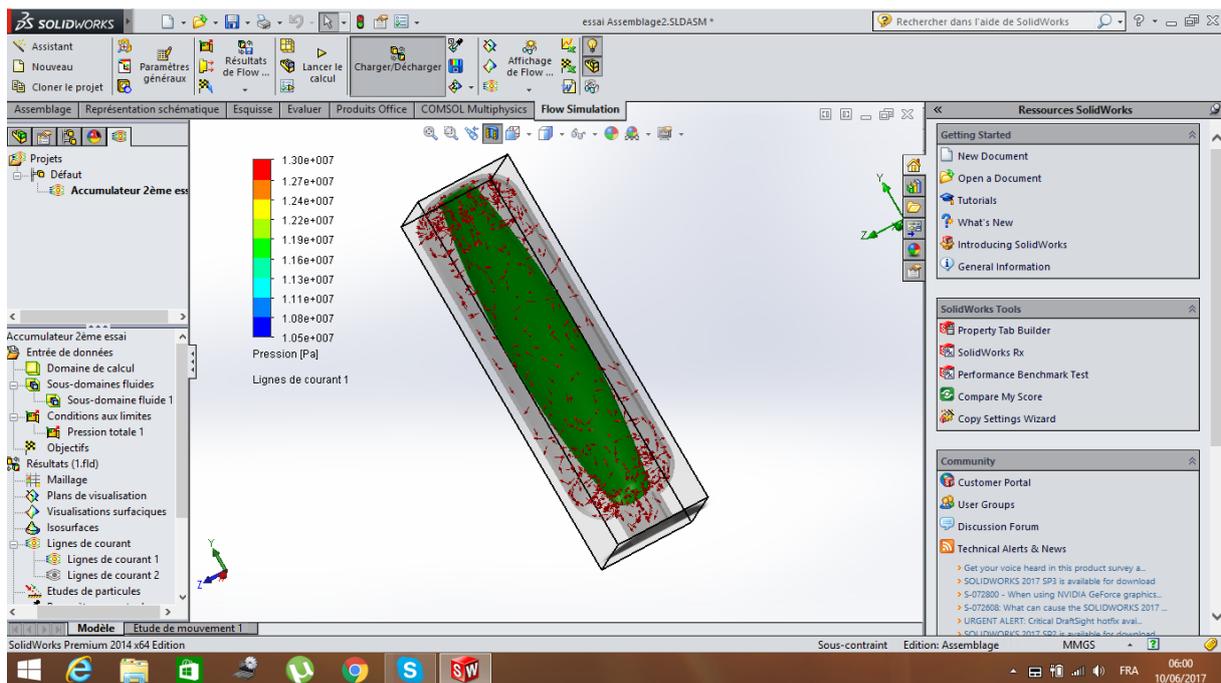
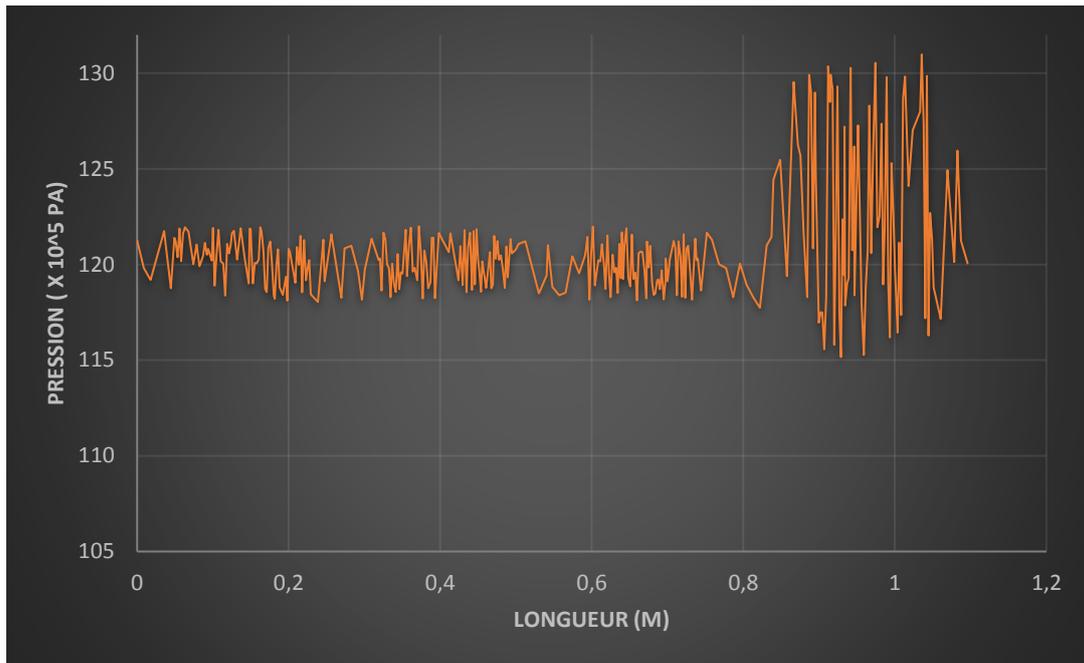


Figure VII.2 : Ecoulement de l'huile dégradée dans l'accumulateur

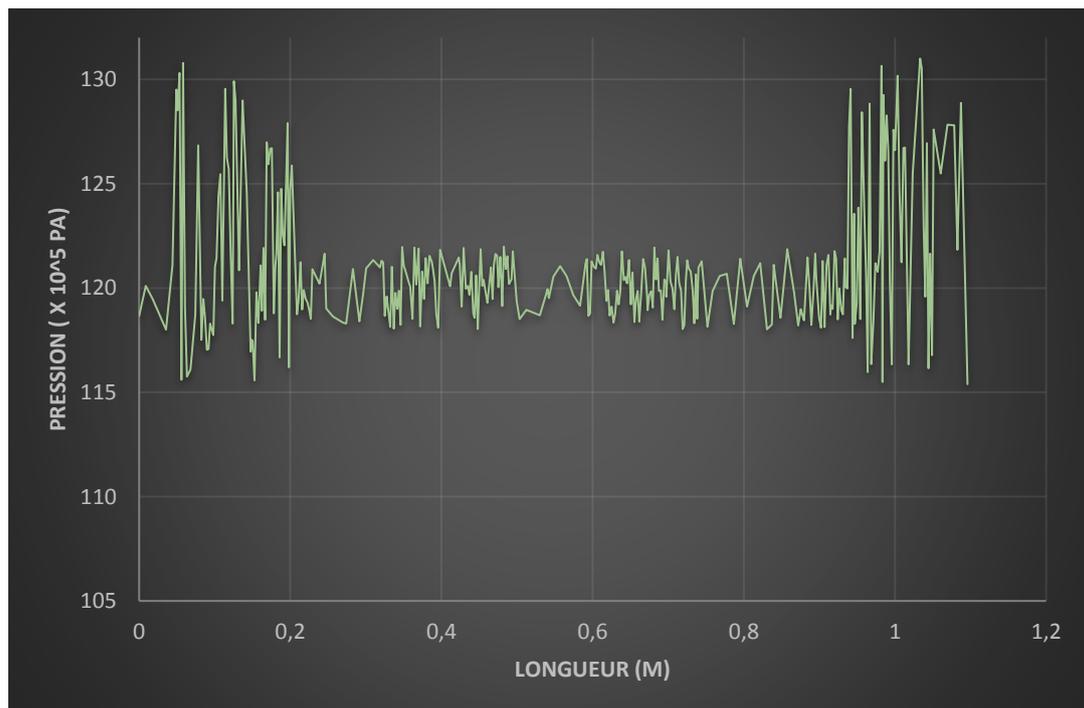
#### VII.4.1.2. Interprétation des résultats

A la fin de la simulation, nous avons exporté les résultats sous formes de graphes présentant l'évolution de la pression tout le long de l'accumulateur.

Ces graphes sont présentés ci-dessous.



**Figure VII.3. : Evolution de la pression le long de l'accumulateur (cas de l'huile de bonne qualité)**



**Figure VII.4. : Evolution de la pression le long de l'accumulateur (cas de l'huile dégradée)**

La simulation via SolidWorks, nous a permis de visualiser l'écoulement de l'huile dans l'espace compris entre le corps de l'accumulateur et la vessie.

Les résultats montrent que dans le cas de l'huile en bon état celle-ci s'écoule avec une pression très importante à l'extrémité supérieure de l'accumulateur, ce qui n'est pas le cas à l'extrémité inférieure et le centre.

Par contre pour l'huile dégradée, nous remarquons que la pression est très importante aux deux extrémités de l'accumulateur. Cette augmentation de pression dans la l'extrémité inférieure est due à la diminution la viscosité de l'huile et à l'augmentation de sa densité.

## VII.4.2. Simulation via COMSOL

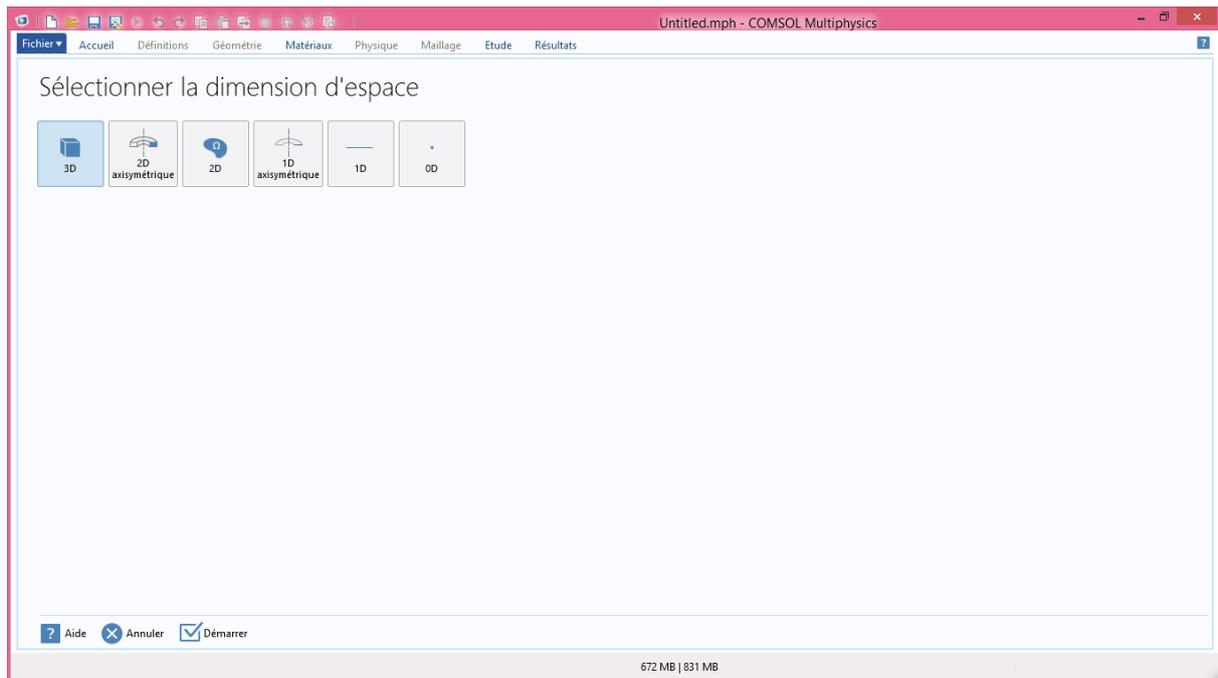
### VII.4.2.1. Manipulation

Le principal intérêt de la simulation via COMSOL est d'étudier la résistance de la vessie aux pressions. Pour ce faire, nous avons analysé le comportement de cet élément vis-à-vis de la pression qu'engendrerait l'admission de l'huile dans l'accumulateur.

Les étapes de la simulation sont comme suit :

- Choix du domaine

Nous avons commencé par choisir un domaine : dans notre cas, il s'agit du 3D étant donné que nous devons étudier l'ensemble de la vessie.



**Photo VII.8. Choix du domaine**

- Suite à cela, nous avons sélectionné la physique ainsi que l'étude nécessaire à notre simulation. En ce qui concerne la physique, il s'agit de choisir la nature du phénomène à analyser, la mécanique du solide dans notre cas, qui peut régir le comportement du matériau étudié. L'étude quant à elle, détermine le type de simulation à effectuer ; nous avons opté pour une étude stationnaire mettant en scène une pression à un instant donnée. L'intérêt est d'identifier la répartition de la pression indépendamment du temps pour des raisons de simplifications.

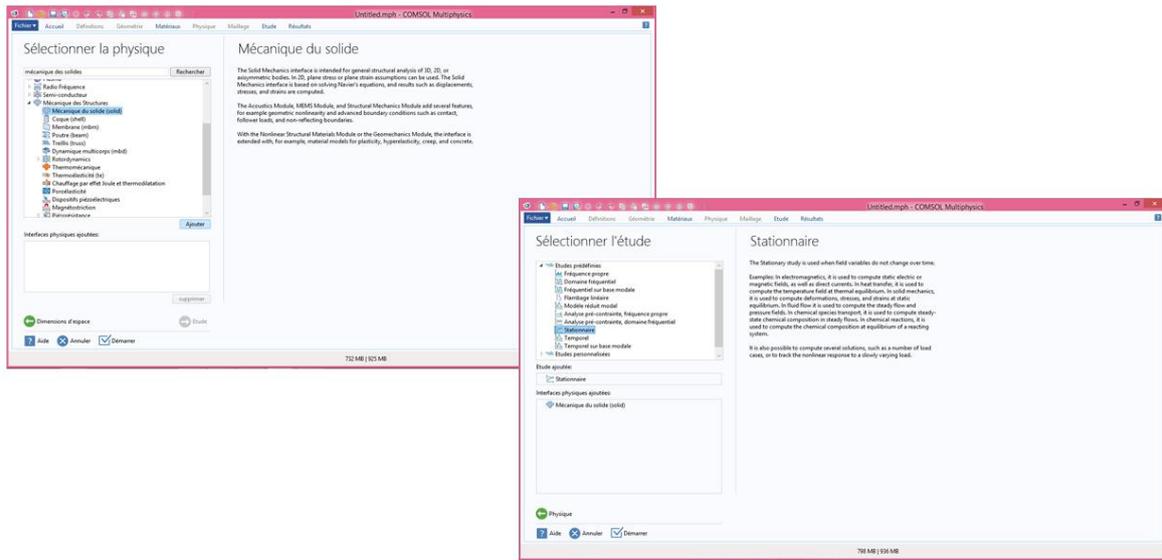


Photo VII.9. Choix de la physique et de l'étude

- Nous avons par la suite importé la géométrie en utilisant le module complémentaire du logiciel permettant de sélectionner des pièces faites sur SolidWorks ;

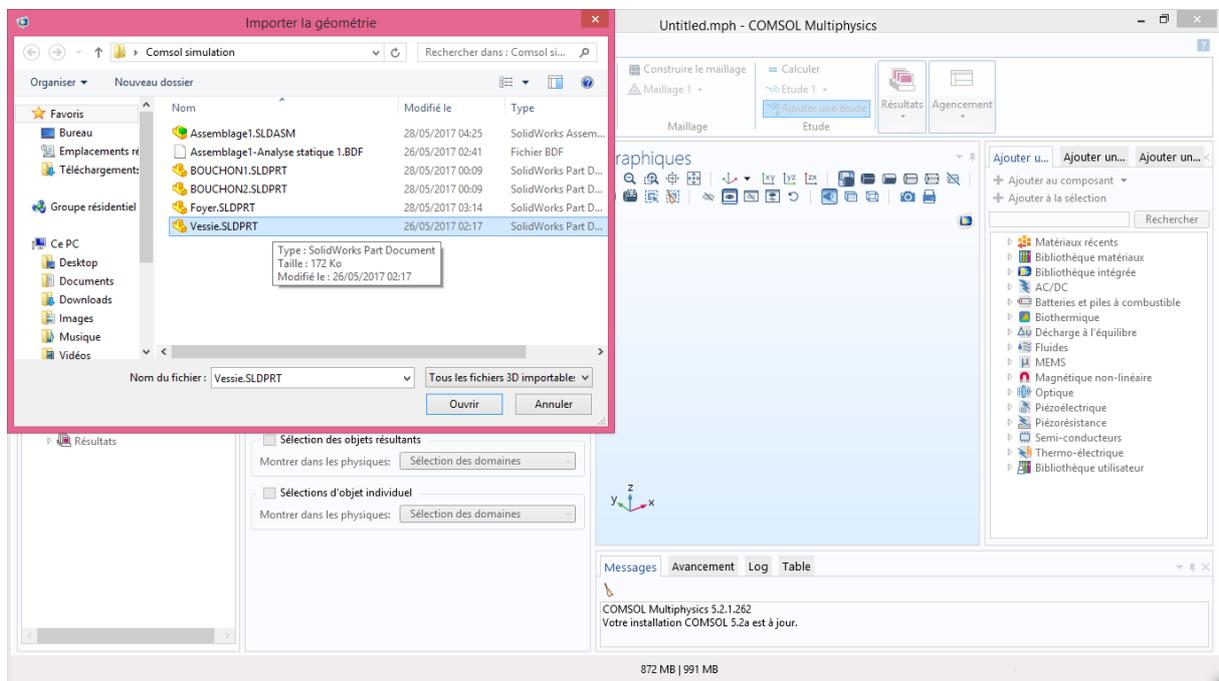


Photo VII.10. Importation de la géométrie de la vessie

- Conditions aux limites

La définition des conditions aux limites est nécessaire, nous avons alors introduit ce qui suit :

- Les propriétés du matériau qui consiste en du caoutchouc, à savoir : le module de Young ( $E$ ) d'une valeur de  $1,6 * 10^5 Pa$ , le coefficient de poisson ( $\nu$ ) de 0,3 et la masse volumique ( $\rho$ ) de  $910 kg/m^3$  ;
- La valeur du chargement sur les parois en définissant la valeur de la pression à l'intérieur et à l'extérieur de la vessie. Dans le cas de notre étude, le compartiment intérieur est rempli d'Azote à une pression de 80 bar, alors que le compartiment externe subit la pression de l'huile introduite à 130 bar (valeur maximale admise) ;
- Les déplacements imposés, en sélectionnant les faces fixes et celles pouvant subir des déformations par déplacement.

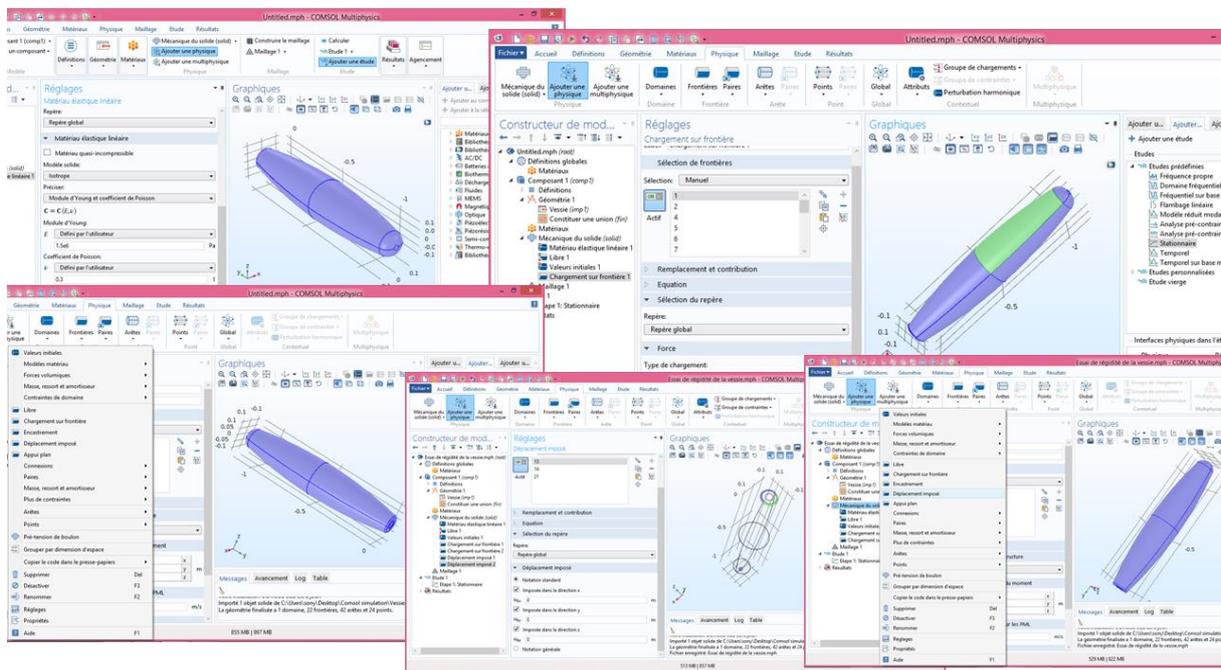


Photo VII.11. Introduction des conditions aux limites

- Maillage

Nous avons par la suite inséré le maillage de l'élément automatiquement en sélectionnant toute la séquence.

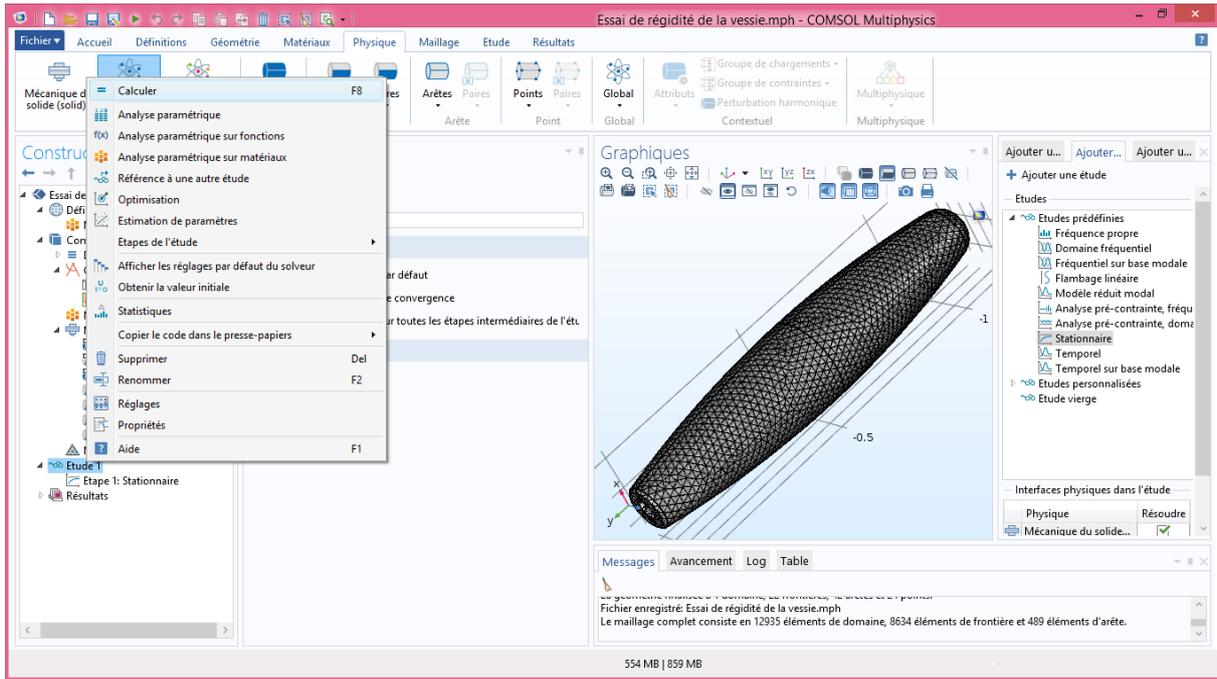


Photo VII.12. Insertion du maillage

- Exécution du calcul : Enfin, nous avons lancé le calcul.

Les résultats de la simulation sont représentés dans les figures suivantes.

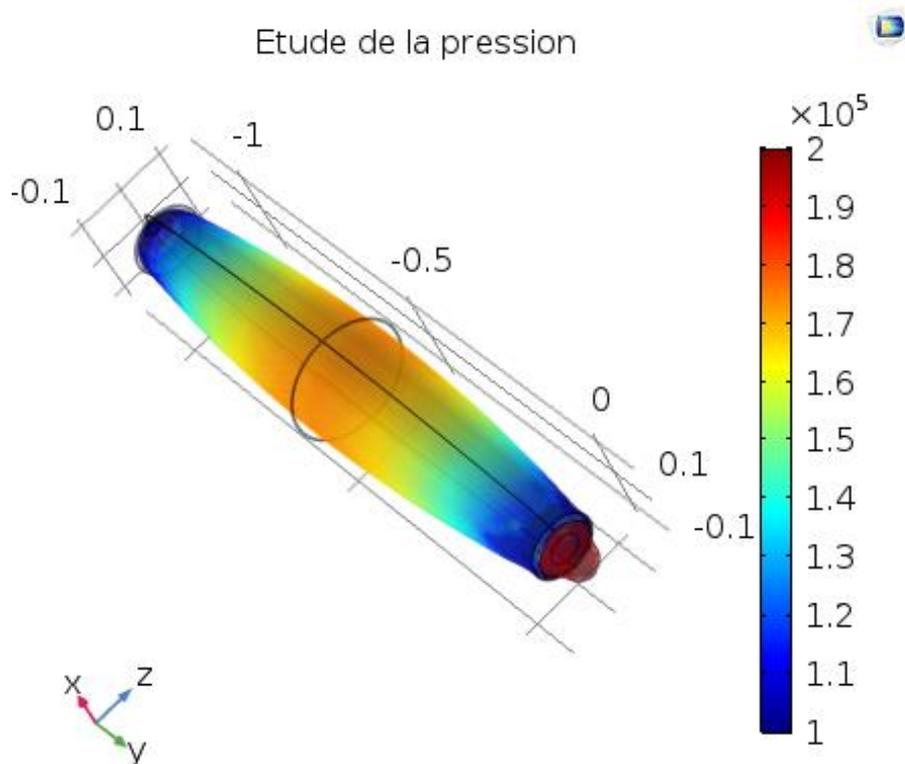


Figure VII.5 : Répartition de la pression sur COMSOL

#### **VII.4.2.2. Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus par le logiciel COMSOL montrent une répartition non homogène de la pression exercée par l'huile sur la vessie. Nous avons pu remarquer qu'elle est plus importante au niveau des extrémités, c'est-à-dire le point de rattachement de la vessie et le point d'entrée du fluide. Cela nous mène à dire que la non homogénéité de l'écoulement de l'huile risque de dégrader la qualité de la vessie au niveau des extrémités et peut même causer son éclatement selon les rapports du fournisseur.

#### **VII.5. Interprétation générale**

En comparant les résultats obtenus par les deux simulateurs, nous pouvons dire que la simulation faite par Comsol confirme celle obtenue avec SolidWorks. Effectivement, les deux simulateurs ont montré la non homogénéité de l'écoulement de l'huile au sein de l'accumulateur. La pression varie d'un point à un autre, elle est nettement plus importante au niveau des extrémités et cela se justifie par la présence des singularités sur les deux côtes de l'accumulateur. L'écoulement pénètre à travers un orifice, il diverge ensuite pour converger à l'autre bout de l'accumulateur. Toutes ces contraintes accélèrent la dégradation du matériau de la vessie et risquent de provoquer son éclatement.

## Conclusion générale

L'objectif de l'étude qui nous a été proposée était de déterminer les causes du dysfonctionnement des accumulateurs de la station de production électrique de Hajdret Enouss, et ce en étudiant les hypothèses que nous avons émises suite à la compréhension de la situation.

Pour répondre à la problématique, nous avons d'abord analysé les propriétés physico-chimiques de l'huile à travers des essais sur des échantillons de différentes qualités. Ces résultats nous ont servis de paramètres d'entrée lors des simulations effectuées avec différents logiciels.

Afin de prendre en compte l'effet de la pression sur la vessie, nous avons réalisé deux simulations à l'aide de deux logiciels : SolidWorks et Comsol, ces derniers ont montré une répartition non homogène de la pression sur la vessie. Ce phénomène entraîne forcément une dégradation du matériau de la vessie et peut donc causer son éclatement.

A la lumière des résultats obtenus, nous avons pu valider nos hypothèses, à savoir : l'effet de la pression sur la vessie et la dégradation de la qualité de l'huile. En effet, la répartition non homogène de la pression crée des points de sensibilité de la vessie au niveau de son point d'attache ainsi qu'à l'entrée du fluide. De plus la dégradation de l'huile possède un impact sur l'écoulement en lui-même, tel qu'on a fait le même constat que précédemment au niveau de singularités représentées par l'entrée de l'huile et le point d'attache de la vessie.

Néanmoins, il est nécessaire de procéder à d'autres simulations. D'une part en vue d'affiner notre étude, et ce en prenant en considération toutes la difficulté des paramètres que nous avons simplifiés lors de la manipulation de nos simulations. Et d'autre part, en analysant divers autres hypothèses pouvant se créer autour de cette problématique, à savoir : l'effet de la pression sur l'ensemble du système et l'aspect indéfini de la déformation de la vessie.

En vue d'apporter plus de détails à ce travail, nous nous proposons de vérifier ces deux dernières hypothèses dans nos mémoires de Master.

## Références bibliographiques

- [1] General Electric, GE AR16 AboutGE MDA, 2016, Internal company documents.
- [2] General Electric, GE AR16 International, 2016, Internal company documents.
- [3] GEI-41040E, « Fuel Gases for combustion in Heavy-Duty Gas Turbines », Internal company documents.
- [4] GER-3620L, « Heavy-duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations », Internal company documents, September 2011.
- [5] Excel Report, « Algeria implementation », Internal company documents.
- [6] Rapport « Etude de danger de la station de Hadjret Enouss », SNC LAVALIN, Aout 2008, Rapport interne de l'entreprise.
- [7] <http://www.snclavalin.com/fr/skikda-combined-cycle-power-plant-hadjret-en-nouss-and-fouka-desalination-plant>
- [8] <https://powergen.gepower.com/products.html>
- [9] REKIK, Sami. Circuit Hydraulique : conception et maintenance [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.electromecanique.org/images/images/circuitHydraulic.pdf> >.
- [10] LABONVILLE Réjean. Conception des circuits hydrauliques : une approche énergétique. Edition corrigée. Canada : Presses Internationales Polytechnique, 1999. 572 p. ISBN 9782553007774.
- [11] Federal Aviation Administration. Hydraulic and Pneumatic Power System. In *Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe Volume 1*. U.S : U.S. Department of Transportation, 2012, Chapter 12, p. 79 – 91.
- [12] BOUAJILA, Sofiane. Dynamique des fluides appliqués [en ligne]. ISET Nabeul, 2006. Disponible sur : < <http://cregen.free.fr/1%20-%20Cours/Dynamique%20des%20fluides%20appliqu%20e.pdf> >.
- [13] S R Majumdar. Oil Hydraulic Systems : principles and maintenance. India : the Tata McGraw-Hill Publishing Company, 2001. 542 p. ISBN 0-07-463748-7.
- [14] SOTO, Jean. Mécanique des fluides, Annexe : pompes centrifuges [en ligne]. 2006. Disponible sur : < <https://fr.scribd.com/document/320388353/pompe-centrifuge-pdf> >.
- [15] GE Documents, HPU-EOS.
- [16] José Roldan Vilorio. Aide-Mémoire Hydraulique industrielle. France : DUNOD, 2014. 310 p. Aide-Mémoire Ingénieur. ISBN 2100714341.
- [17] BOULAY, Thierry. Hydraulique industrielle [en ligne]. IUT de Sénart, 1975. Disponible sur : < <http://thierryboulay.free.fr/enseignements/hydraulique/hydraulique.pdf> >.
- [18] ISO : International Organization for Standardization . ISO 1219. Fluid power systems and components— Graphical symbols and circuit diagrams. Switzerland : ISO 2016. 23 p.
- [19] Marghitu Dan .Mechanical Engineer's Handbook. Elseiver . 2001. 392p. ISBN 978-0-12-471370-3.

- [20] Ge documentation, Power Services.
- [21]. Mobley.R. Fluid power dynamics. Elseiver , 2000. 291p ISBN 978-0-7506-7174-3.
- [22] W. Forshoffer .Forshoffer’s Best Practice Handbook for rotating machinery. Elseiver , 2011.352P. ISBN 978-0-08-096676-2.
- [23] [www.experts-insitu.com](http://www.experts-insitu.com)
- [25] Rejean Labonville .Conception des circuits hydrauliques. Edition PADIE .1999.250p. ISBN 09565123.
- [26] Gérard DALLEMAGNE .Fluides hydrauliques-Fonctions et Classification. techniques de l’ingénieur. 10 janvier 1999.
- [27] Gérard DALLEMAGNE. Facteurs d’influence -Fonctions et Classification .techniques de l’ingénieur. 10 janvier 1999
- [28] National Taiwan Normal University, Department of physics. Articles : aéromètre. [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.phy.ntnu.edu.tw/oldjava/articles/T500137.htm> >.
- [29] Mettler Toledo. Laboratory analytical instruments. [en ligne]. Disponible sur : < [http://www.mt.com/ch/fr/home/library/know-how/lab-analytical\\_instruments/comparison-measuring-methods-dere.html](http://www.mt.com/ch/fr/home/library/know-how/lab-analytical_instruments/comparison-measuring-methods-dere.html) >.
- [30] Gérard DALLEMAGNE .Fluides hydrauliques-méthode d’analyse. techniques de l’ingénieur. 10 janvier 1999.
- [31] Suzanne Degallais et Bernard Ilschner, *Caractérisation expérimentale des matériaux I, Propriétés physiques, mécaniques et thermiques*, PPUR, collection « Traité des matériaux ». 2007, 416 p. ISBN 978-2-88074-567-7. p. 107.
- [32] [en ligne]. Disponible sur : < [https://fr.wikipedia.org/wiki/Viscosim%C3%A8tre#Viscosim.C3.A8tre\\_rotationnel\\_de\\_laboratoire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Viscosim%C3%A8tre#Viscosim.C3.A8tre_rotationnel_de_laboratoire) >.
- [33] Viscosité des fluides [en ligne]. Disponible sur : < <https://viscositedesfluides.wordpress.com/les-viscosimetres/> >.
- [34] Analyse chimique, méthodes et techniques instrumentales modernes, Francis ROUESSAC, DUNOD, p 320.
- [35] COMSOL. COMSOL Multiphysics [en ligne]. Disponible sur < <https://www.comsol.fr/comsol-multiphysics> >.
- [36] COMSOL. COMSOL Multiphysics [en ligne]. Disponible sur < <http://www.solidworks.fr/sw/3d-cad-design-software.htm> >.
- [37] ELOUZERI Hichem. Conception d’un compresseur pour la réfrigération industrielle par el logiciel SolidWorks. 87 p : Génie mécanique : ENP : 2009.