

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

**Etude de l'impact de contamination d'huile
hydraulique sur le fonctionnement de la servovalve de
contrôle de la vanne de réglage de gaz combustible**

TERCHI Imene / SIAD Radjaa

Sous la direction de

Pr	Saâdia BENMAMAR	Professeur
M ^f	Hamza ZOUAOU	Ingénieur

Présenté et soutenu publiquement le 06 Juillet 2020

Composition du Jury

Président	M ^f Salim BENZIADA	MAA	ENP
Promoteur	M ^{me} Saâdia BENMAMAR	Professeur	ENP
	M ^f Hamza ZOUAOU	Ingénieur	General Electric
Examineur	M ^{me} Meriem CHETIBI	Docteur	ENP
	M ^f Salah Eddine TACHI	MCB	ENP
	M ^f Rabie MESSAHLI	MAA	ENP

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

**Etude de l'impact de contamination d'huile
hydraulique sur le fonctionnement de la servovalve de
contrôle de la vanne de réglage de gaz combustible**

TERCHI Imene / SIAD Radjaa

Sous la direction de

Pr Saâdia BENMAMAR Professeur
M^f Hamza ZOUAOUI Ingénieur

Présenté et soutenu publiquement le 06 Juillet 2020

Composition du Jury

Président	M ^f Salim BENZIADA	MAA	ENP
Promoteur	M ^{me} Saâdia BENMAMAR M ^f Hamza ZOUAOUI	Professeur Ingénieur	ENP General Electric
Examineur	M ^{me} Meriem CHETIBI M ^f Salah Eddine TACHI M ^f Rabie MESSAHLI	Docteur MCB MAA	ENP ENP ENP

Dédicaces

“

Je dédie ce travail :

À ma mère et mon père, qui ont sacrifié leur vie pour notre réussite, je ne saurais vous exprimer tout le respect que je vous dois, l'amour et la considération que je vous porte.

À mes frères et sœurs Ryane et Samah, Mustapha ali et Abdel rahim pour leur soutien, nul ne pourrait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous.

À Lotfi, mon ami, jamais je ne pourrais te remercier pour tout ce que tu fais pour moi.

À Mon binôme, mon amie et ma sœur Imene, pour tous ces bons moments passés ensemble, sans toi rien de cela n'aurait été possible.

À tonton Halim, le père de mon binôme pour nous avoir soutenu tout au long de ce stage.

À ma famille , tous mes amis chacun son nom , en particulier les compagnons du long chemin Emy , Sarah , Ilham , Rima , Feriel , khadidja , loubna , Islem et Ihssen , avec tous mes vœux de succès.

”

- Radjaa

Dédicaces

“

Je dédie ce travail :

À ma chère mère et à mon cher père qui n'ont jamais cessé de me supporter, me soutenir et m'encourager durant mes années d'études.

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude et reconnaissance.

À ma chère soeur Mahdia et mon cher frère Nadjib qui ont été toujours mon exemple dans la vie.

À mes grands-mères, ma belle-sœur Linda, mon beau frère Mohamed, mon adorable nièce Lylia, mes chers oncles, tantes, cousins et cousines, qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

À tous ceux qui m'ont aidé - de près ou de loin - et ceux qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

À tous mes amis, je cite en particulier Ferial, Marwa, Meriem, Imene, Halima, Yasmine, mes amis du VIC, qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

À ma chère Binôme Radjaa, pour toutes les étapes qu'on a traversé ensemble, son encouragement, son grand cœur et sa patience. Merci !

”

- Imene

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre grande reconnaissance envers les personnes qui nous ont - de près ou de loin - apporté leurs soutiens. Qu'ils trouvent ici collectivement et individuellement l'expression de toute notre gratitude et notre reconnaissance.

Nous tenons à remercier tout particulièrement et à témoigner toute notre reconnaissance à notre professeurs encadrante Pr **BENMAMAR Saâdia**, en dépit de ses multiples charges, son aide et les renseignements précieux qu'elle nous a fournis ainsi que pour tous les conseils et les informations qu'elle nous a prodigués avec un degré de patience et de professionnalisme sans égal.

Nous tenons à remercier également Mr. **ZOUAOUI Hamza** et Mr. **BAHET Abdelam** , pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'ils nous ont fait vivre durant la période du stage, pour tous les conseils et les informations qu'ils nous ont prodigués et pour le temps qu'ils ont consacré à l'encadrement et le suivi de ce travail. Nous remercions également tous ceux qui nous ont aidé au sein de l'entreprise, Nous citons en particulier Mr. OULD AKLOUCHE Hani

Nous tenons aussi à adresser nos plus sincères remerciements à l'ensemble du corps administratif et enseignant de l'Ecole Nationale Polytechnique , pour avoir porté un vif intérêt à notre formation, et pour nous avoir accordé de l'attention et de l'énergie, et ce, dans un cadre agréable de respect.

Que les membres de jury trouvent, ici, l'expression de nos remerciements pour l'honneur qu'ils nous font en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.

ملخص

الهدف من أطروحتنا هو دراسة تأثير تلوث الزيت الهيدروليكي على تشغيل الصمام الموازر المسؤول عن ضبط صمام التحكم بغاز الوقود في التوربين الغازي. تم تطبيق هذا العمل على النظام الكهرو هيدروليكي لمحطة حجرة النوس.

من خلال عينات الزيت الهيدروليكي المأخوذة على مستوى المصنع ، تمكنا من إجراء تحليلات الزيت ، ودراسة خصائصه الفيزيائية الكيميائية ، ومن ناحية أخرى ، إجراء محاكاة باستخدام برنامجين مختلفين (سيمولينك و سيمولايشن إكس) باستخدام الخصائص المقاسة. تمكنا أخيراً من تقديم حلول فعالة للحفاظ على التشغيل السليم للخدمة الموازر.

الكلمات الدالة : الصمام الموازر, التوربين الغازي, النظام الكهرو هيدروليكي, حجرة النوس, سيمولينك, سيمولايشن إكس

Abstract

The aim of our thesis is to study the impact of hydraulic oil contamination on the operation of the servovalve responsible for controlling the fuel gas control valve in the gas turbine. This work was applied to the electrohydraulic system of the Hadjret Ennous power plant.

Through the hydraulic oil samples taken at the plant level, we were able to carry out oil analyzes, study its physicochemical properties and, on the other hand, carry out a simulation with two different software programs (Simulink et SimulationX) using the properties measured. We were finally able to offer effective solutions to maintain proper operation of the servovalve.

Key Words: Servovalve, Gaz turbine, Electrohydraulique, Hadjret Ennous, Simulink, SimulationX

Résumé

L'objectif de notre thèse est d'étudier l'impact de la contamination d'huile hydraulique sur le fonctionnement de la servovalve responsable de contrôler la vanne de réglage de gaz combustible dans la turbine à gaz. Ce travail a été appliqué au système électrohydraulique de la centrale électrique de Hadjret Ennous.

A travers les échantillons d'huile hydraulique relevées au niveau de la centrale, nous avons pu effectuer des analyses d'huile, étudier ses propriétés physico-chimiques et d'autre part procéder à une simulation avec deux différents logiciels (Simulink et SimulationX) en utilisant les propriétés mesurées. Nous avons pu enfin proposer des solutions efficaces pour maintenir un bon fonctionnement de la servovalve.

Mots clés: Servovalve, Turbine à gaz, Electrohydraulique, Hadjret Ennous, Simulink, SimulationX

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des sigles et acronymes

Introduction	16
1 Station de Hadjret Ennous	18
1.1 Introduction	19
1.2 Présentation de la centrale électrique de Hadjret Ennous	19
1.3 Diagnostic et problématique	26
2 Description et diagnostic du système hydraulique	28
2.1 Introduction	29
2.2 Système hydraulique	29
2.3 Système d'huile hydraulique de commande	40
3 Les fluides hydrauliques-Analyse de l'huile du système de Hadjret Ennous	44
3.1 Introduction	45
3.2 Généralités sur les fluides hydrauliques	45
3.3 Classification des fluides hydrauliques	45
3.4 Propriétés du fluide hydraulique	46
3.5 Analyses d'huile du système actuel	52
4 Modélisation du système électrohydraulique	64
4.1 Introduction	65
4.2 Servovalve	65
4.3 Les récepteurs hydrauliques	70

Table des matières

4.4	Modélisation mathématique du système	71
5	Simulation	75
5.1	Introduction	76
5.2	Simulation via Simulink(Matlab)	76
5.3	Simulation via SimulationX	90
6	Amélioration de la qualité d’huile et du circuit hydraulique de la servo- valve	95
6.1	Introduction	96
6.2	Les causes de vieillissement des huiles hydraulique	96
6.3	Les solutions proposées	99
	Conclusion générale	105
	Bibliographie	107
	Annexes	110

Table des figures

1.1	Vue satellite de la centrale à cycle combiné Hadjret Ennous par Google Earth.	20
1.2	Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné à arbre unique.	20
1.3	Cycle de brayton dans une turbine a gaz [Massachusetts Institute of technology, 2018].	22
2.1	Modèle fonctionnel :Pompe	33
2.2	Schéma du système hydraulique étudié.	38
3.1	Variation de la masse volumique d'une huile avec la température[DALLEMAGNE, 1999b].	48
3.2	Variation de la masse volumique d'une huile avec la pression[DALLEMAGNE, 1999b].	49
3.3	Propriétés de viscosité-pression de divers liquides. [FAULKNER, 1999] . . .	51
3.4	Propriétés viscosité-température des liquides à indice de viscosité élevé et faible[FAULKNER, 1999].	52
3.5	Interprétation des essais de viscosité de l'huile neuve	57
3.7	Interprétation des essais de viscosité de l'huile fournie par le fabricant . .	57
3.6	Interprétation des essais de viscosité de l'huile ancienne	58
4.1	Modèle fonctionnel :Servovalve	65
4.2	Architecture générale d'une servovalve	66
4.3	Architecture d'une servovalve à deux étages	67
4.4	Servovalve de type buse-palette	68
4.5	Servovalve type jet pipe	69

Table des figures

4.6	Servovalve 4/3 (4 orifices et 3 positions)	69
4.7	Les positions de centre d'une servovalve 4/3	69
4.8	Modèle fonctionnel : Vérin Hydraulique.	70
4.9	a)Vérin à simple effet (b) Vérin à double effet	71
5.1	Fenêtre de la bibliothèque Simhydraulics	77
5.2	Modélisation d'unité de puissance en Simhydraulics	79
5.3	Modélisation de la servovalve	80
5.4	Modélisation d'un vérin a simple effet en Simhydraulics	81
5.5	système électrohydraulique	82
5.6	Block de paramètres de fluide	83
5.7	Configuration du solver	83
5.8	La position du piston du vérin (cas de l'huile neuve)	84
5.9	La position du piston du vérin (cas de l'huile en service)	85
5.10	La vitesse de l'assemblage clapet-armature (cas de l'huile neuve)	86
5.11	La vitesse de l'assemblage clapet-armature (cas de l'huile en service)	86
5.12	La pression dans le clapet-buse (cas de l'huile neuve)	87
5.13	La pression dans le clapet-buse (cas de l'huile en service)	87
5.14	Le taux d'ouverture de la vanne principale (cas de l'huile neuve)	88
5.15	Le taux d'ouverture de la vanne principale (cas de l'huile en service)	88
5.16	La vitesse d'ouverture de la vanne principale (cas de l'huile neuve)	89
5.17	La vitesse d'ouverture de la vanne principale (cas de l'huile en service)	89
5.18	Les composants de la bibliothèque hydraulique	91
5.19	L'interface du logiciel simulationX	91
5.20	La création du système électrohydraulique étudié	92
5.21	Configuration des paramètres d'huile	92
5.22	Évolution de la pression à la sortie de la servovalve (cas de l'huile neuve)	93
5.23	Évolution de la pression à la sortie de la servovalve (cas de l'huile en service)	93
6.1	Le circuit hydraulique de la servovalve après l'ajout des filtres)	101
6.2	Évolution de la pression à la sortie de la servovalve (cas de l'huile en service) après l'ajout des filtres	102

Table des figures

.1	Turbine à gaz GE de type "9FB".	111
.2	Turbine à Vapeur GE Alstom A15.	111
.3	Essai d'indice d'acide	111
.4	Essais de masse volumique au pycnomètre	112

Liste des tableaux

1.1	Les caractéristiques typiques de la vapeur produite par chacune des chaudières de récupération	23
2.1	Symboles des composants du schéma hydraulique.	39
3.1	Masses volumiques des principales huiles	47
3.2	Résultats des essais de l'indice d'acidité	55
3.3	Résultats des essais de viscosité de l'huile neuve	56
3.4	Résultats des essais de viscosité de l'huile ancienne	56
3.5	Résultats des essais de viscosité de l'huile fournie par le fabricant	57
3.6	Résultats des essais de masse volumique sur l'huile neuve et en service . . .	59
3.7	Résultats des essais de la teneur en eau par KF	61
3.8	Résultats des essais de la spectroscopie	62
6.1	Gamme de maintenance préventive conditionnelle	104

Liste des sigles et acronymes

CCPP	<i>Comined Cycle Power Plant</i>
SPE	<i>Société de Production de l'Electricité</i>
PCI	<i>Pouvoir Calorifique Inférieur</i>
HRSG	<i>Heat Recovery Steam Generator</i>
TV	<i>Turbine à Vapeur</i>
GV	<i>Turbine à Gaz</i>
HP	<i>Haute Pression</i>
MP	<i>Moyenne Pression</i>
BP	<i>Basse Pression</i>
DLE	<i>Dry Low Emission</i>
EHC	<i>Electro-Hydraulic Control</i>
GCV	<i>Gaz Control Valve</i>
RSV	<i>Stop-Ratio Valve</i>
RSV	<i>Reheat Stop Valve</i>
MSV	<i>Main Stop Valve</i>
MCV	<i>Main Control Valve</i>
ICV	<i>Interceptor Valve</i>
IGV	<i>Inlet guide valve</i>

Liste des tableaux

VDC *Voltage Directionnel Courant*

KF *Karl Fischer*

FSR *Fuel Stroke Reference*

Introduction

Le système hydraulique est un assemblage de composants fonctionnant de manière unitaire et souvent en interaction, en utilisant un fluide incompressible comme moyen de transmission pour effectuer un travail mécanique.

Il 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 qui est dans notre cas une huile de type Phosphate Ester, est propulsé via des pompes à partir d'un réservoir à une pression bien déterminée. Une contamination de cette huile peut provoquer le dysfonctionnement des pompes qui entraîne par la suite 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.

Pour une sûreté de fonctionnement, l'analyse de ce fluide hydraulique constitue un moyen efficace de surveillance. Du point de vue qualité, une huile inadaptée ou mauvaise réduit fortement la durée de vie des parties mobiles dans une machine, Le choix de la qualité d'huile hydraulique et sa méthode d'utilisation doivent être particulièrement étudiés.

Les travaux entrepris dans cette thèse s'inscrivent dans une démarche visant à étudier la source et l'impact de la contamination sur la vanne de contrôle de combustible de la turbine à gaz (GCV) de la centrale électrique de Hadjret Ennous. Différentes hypothèses sont émises, entre autres, la dégradation de la qualité de l'huile, une dépression . . .

Pour ce faire, le présent manuscrit est scindé en 6 chapitres :

Le premier chapitre comporte une brève présentation de la centrale électrique de Hajret Ennous. Il expose en effet, la problématique et met l'accent sur la solution proposée.

Le second et le troisième chapitres sont consacrés respectivement à la présentation détaillée du système d'alimentation hydraulique et à la modélisation d'un système électrohydraulique de commande.

Dans le quatrième chapitre, nous évoquons succinctement les différents fluides hydrauliques et leurs propriétés, en établissant un bilan des résultats obtenus à partir des essais physico-chimiques qui ont été réalisés sur les échantillons d'huile de commande de notre système 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 d'huile dans notre système hydraulique réalisées avec deux différents logiciels; Simulink (MATLAB) et SimulationX qui seront présentés dans le cinquième chapitre.

Dans le dernier chapitre, des solutions pratiques pour maintenir les caractéristiques fonctionnelles de la servovalve en intégrant des filtres dans le circuit ont été proposées, ainsi que les mesures à suivre pour éliminer toute contamination d'huile présente dans le système.

En fin, on clôture par une conclusion générale où une interprétation des tous les résultats obtenus lors de cette étude est donnée.

Chapitre 1

Station de Hadjret Ennous

Chapitre 1 : Station de Hadjret Ennous

1.1 Introduction

Les centrales électriques sont le cœur battant de l'industrie de l'énergie, jouant un rôle essentiel dans la production d'électricité tout en favorisant le développement social mondial et les progrès technologiques.

L'infrastructure de production d'électricité doit donc refléter une application des principes économiques et d'ingénierie non seulement dans la conception, mais aussi dans la prise de décisions en matière de planification et d'exploitation.

Afin d'assurer le fonctionnement fiable et économiquement stable des composants du système électrique, en particulier dans les centrales électriques, des stratégies de maintenance rapides et efficaces sont impératives. Ce n'est qu'alors que les composants du système peuvent fonctionner de manière fiable, avec un minimum de pannes et des conséquences indésirables.

1.2 Présentation de la centrale électrique de Hadjret Ennous

Shariket Kahraba Hadjret Enouss Spa (SKH Spa) résulte d'un partenariat entre cinq (05) entités indépendantes, dans le cadre de la nouvelle loi algérienne sur l'électricité et la distribution publique de gaz par canalisations. Ses actions se répartissent comme suit :

- 26% SNC
- 25% Mubadala Development Company
- 17,15% Sonelgaz
- 17,15% Sonatrach
- 14,70% Algerian EnergyCompany (AEC)

Les travaux de construction débutent en Juin 2006 et prennent fin en 2008 avec une mise en opération de la première tranche de la centrale en Août de la même année. La centrale a une puissance nette d'environ 1 200 MW (garantie à 30C - combustible gaz naturel) ou 840 MW (Combustible gasoil comme combustible de secours) [SNC LAVALIN, 2019].

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 Cherrhell. Elle est limitée au sud par la route nationale numéro 11, à l'ouest par une piste, à l'est par Oued Arbal et au nord par la mer Méditerranée .

Le site possède une superficie d'environ 35 hectares, occupée par plusieurs bâtiments dont trois principaux, abritant chacun un train turbo-alternateur, auquel est jointe une chaudière de récupération. Les autres bâtiments de la centrale contiennent les unités pour le traitement de l'eau, le poste de départ, les bureaux pour l'administration et la salle de

contrôle, les équipements d'entretien et les entrepôts [SNC LAVALIN, 2008].



Photo 1.1 – Vue satellite de la centrale à cycle combiné Hadjret Ennous par Google Earth.

Présentation du cycle combiné de la centrale de Hadjret Ennous

Il est connu que les centrales électriques à cycle combiné peuvent produire un rendement net plus élevé, qui est d'environ 56% par rapport à un pouvoir calorifique inférieur (PCI). Cette efficacité est obtenue en récupérant la chaleur des gaz d'échappement de la turbine à gaz (ou turbine à gaz) à travers la chaudière de récupération pour générer de la vapeur à haute pression pour entraîner la turbine à vapeur. Les gaz d'échappement ainsi refroidis sont finalement évacués dans l'atmosphère à une température qui peut descendre sous les 100 °C par des cheminées [General Electric, 2020b].

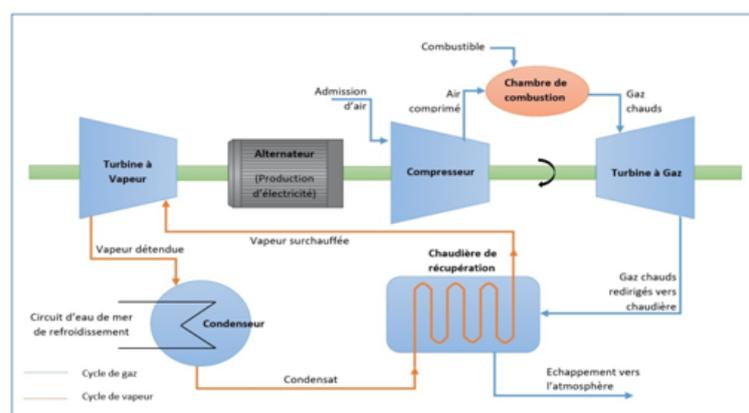


FIGURE 1.2 – Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné à arbre unique.

La vapeur haute pression détendue dans la TV est par la suite condensée par circulation

d'eau froide dans un condenseur. Le condensat est retourné à la chaudière de récupération pour s'y évaporer de nouveau, bouclant ainsi le cycle vapeur.

En général, pour ce type de centrale, environ 2/3 de l'électricité sont produits par les turbines à gaz alors que les turbines à vapeur produisent le 1/3 restant. Le combustible principal de la centrale de Hadjret Ennous est le gaz naturel, et le combustible de secours, le Gasoil. L'exploitation de la centrale nécessite environ 2.10^9 kg/m³ gaz naturel par an et est livrée sur le site via des gazoducs à haute pression installés 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 en gaz naturel [SNC LAVALIN, 2008].

Configuration et équipements

La centrale présente une configuration générale à arbre unique (single shaft). Elle est pourvue des composantes principales suivantes :

- Turbines à gaz ;
- Alternateurs ;
- Chaudières de récupération ;
- Turbines à vapeur ;
- Station de pompage ;
- Condenseur ;
- Systèmes de refroidissement ;
- Transformateurs élévateurs et poste de départ ;
- Auxiliaires.

Dans une configuration à arbre unique, la turbine à gaz et la turbine à vapeur sont assemblées sur un arbre commun et par conséquent, elles entraînent un seul alternateur. Le tableau ci-dessous présente un sommaire des caractéristiques de la centrale à cycle combiné de Hadjret Ennous.

1. Turbine 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 se compose de quatre processus comme le montre la figure :

- a - b Compression adiabatique, quasi statique (ou réversible) à l'entrée et au compresseur ;
- b - c Combustion de combustible à pression constante (idéalisée comme addition

- de chaleur à pression constante) ;
- c - d Expansion adiabatique, quasi-statique (ou réversible) dans la turbine et la tuyère d'échappement
 - d - a Refroidir l'air à pression constante jusqu'à son état initial [Massachusetts Institute of technology, 2018].

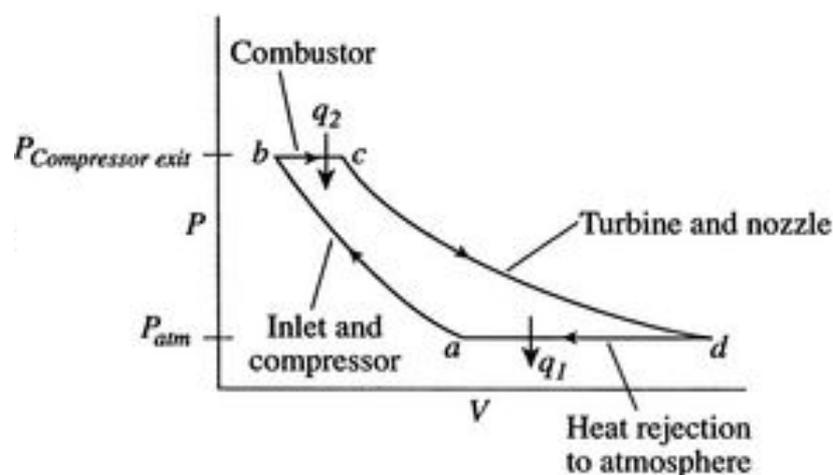


FIGURE 1.3 – Cycle de brayton dans une turbine a gaz [Massachusetts Institute of technology, 2018].

La turbine à gaz de type "9FB" est dotés d'un système de combustion étagée avec pré-mélange du combustible avec l'air ainsi que d'un système de suivi des dynamiques de combustion. Ces turbines 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) [General Electric, 2020a] (Voir annexe).

2. Chaudière de récupération

Les trois turbines à gaz de l'usine sont équipées d'un générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG – Heat Recovery Steam Generator) avec des réservoirs de récupération et des surchauffeurs (y compris des brûleurs de secours).

La vapeur produite par la chaudière de récupération est à trois niveaux de pression différents, ce qui permet de récupérer très largement l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement, tout en minimisant la perte d'énergie de la cheminée. La chaudière de récupération est installée à l'extérieur des bâtiments principaux [SNC LAVALIN, 2008, General Electric, 2020b].

Tableau 1.1 – Les caractéristiques typiques de la vapeur produite par chacune des chaudières de récupération

	Haut pression	Moyenne pression	Basse pression
Pression(Bar)	124	34	4
Température(C°)	565	565	302
Débit(t/h)	464	10	7

Avec, t/h : Unité de débit massique (Tonne/heure)

3. Condenseur

Chaque TV 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 [General Electric, 2020b].

L'eau condensée, qui circule en circuit fermé, retourne aux chaudières de récupération afin d'y être de nouveau évaporée, pressurisée et surchauffée aux conditions requises par la TV.

4. Turbine à vapeur

Les turbines à vapeur installées dans la centrale de Hadjret Ennous sont de type « à condensation avec re-surchauffe ». La vapeur haute pression produite dans les chaudières de récupération est injectée dans les turbines où elle est détendue.

Cette vapeur passe donc par une vanne de haute pression, entre dans le corps HP et se détend jusqu'à la sortie de ce dernier puis elle retourne à la chaudière pour être resurchauffée. Arrivant de la chaudière, la vapeur passe par les vannes interceptrices moyenne pression et entre dans le corps MP-BP. En plus de cette vapeur, il existe une arrivée de vapeur basse pression, au niveau du corps BP [General Electric, 2020b].

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 de chacun des trois bâtiments abritant les turbines. Ce poste comprend principalement trois transformateurs élévateurs de tension et différents appareils de commande.

Chacun de ces transformateurs contient environ 60 000 litres 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 [SNC LAVALIN, 2008].

6. Équipements 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.

(a) 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 [SNC LAVALIN, 2008].

La majeure partie de l'eau de mer est utilisée directement dans le processus de production sans traitement, comme eau de circulation dans le condenseur (utilisation principale) et le système auxiliaire de refroidissement. L'autre partie passe par le système de dessalement avant d'être utilisée dans le processus suivant :

- 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.

(b) 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 réservoirs hors terre d'eau déminéralisée de 600 m^3 permettent d'absorber

les pointes de demande.

(c) 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.

(d) Génératrices de secours

La centrale est équipée d'un ensemble de neuf génératrices, 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. Ces génératrices sont alimentées au diesel.

(e) 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 9,1 Nm³ environ d'hydrogène 200 bars(g), soit l'équivalent d'environ 0,75 kg d'hydrogène.

(f) Le système d'huile d'étanchéité

Le système d'huile d'étanchéité fournit de l'huile d'étanchéité aux plaques d'étanchéité de l'ensemble étanche au gaz TG et à tous les types de fonctionnement, quelles que soient les conditions normales ou d'urgence. Un débitmètre entre l'huile d'étanchéité et l'hydrogène gazeux est maintenu pour éviter les fuites d'hydrogène.

(g) Le système d'huile de lubrification

Le système d'huile de lubrification est utilisé pour rincer, lubrifier et refroidir les roulements et le joint d'arbre sur une turbine et est également applicable à d'autres machines tournantes.

(h) Le système d'air d'atomisation

L'air d'atomisation augmente l'efficacité de combustion du carburant, puis décroît la fumée à l'intérieur des chambres de combustion et cela conduit à augmenter l'efficacité de la turbine.

(i) **DLE (dry low emissions NOx)**

Les faibles émissions sèches (abréviation DLE) sont une technologie qui réduit les émissions de NOx qui s'échappent des turbines à gaz et donc augmenter le rendement de la production.

(j) **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.

1.3 Diagnostic et problématique

La centrale possède un système d'huile hydraulique, qui est alimentée en huile de lubrification, pressurisée à haute pression puis utilisée dans les unités de production pour fournir une puissance de fluide de commande aux différentes unités de production tels que le système d'alimentation en combustible par les deux (2) vannes principales la SRV et la GCV. Ces dernières assurent un gaz sous pression et un flux bien déterminé afin de répondre à toutes les exigences relatives au cycle de : démarrage, arrêt normale et arrêt d'urgence, accélération et chargement de la turbine à gaz.

Suite au dysfonctionnement des servovalves des vannes GCV détecté en 2017, la station a connu un arrêt brusque sur l'une des unités de production, cet arrêt est principalement dû à une contamination de l'huile hydraulique et un changement de pression des servovalves, ce qui a endommagé aussi certains équipements du circuit hydraulique, y compris : les vannes et moteurs hydrauliques, qui peuvent être extrêmement coûteux et fastidieux à remplacer... Le rapport d'investigation fait constat d'un déclenchement de l'alarme des servovalves qui affiche un message de type 'not following reference' et une dégradation de la qualité d'huile hydraulique qui se manifeste par le changement de sa couleur et la présence de particules noires.

En vue du traitement de ce problème, des hypothèses ont été émises afin de diminuer l'impact néfaste de cette contamination sur les différents équipements de la centrale parmi

lesquelles : La maintenance et la re-calibration des servovalves, renforcement du circuit avec des filtres tout en essayant de trouver la source de contamination et de l'éliminer radicalement.

Le présent travail portera sur l'étude de l'impact de la contamination d'huile hydraulique sur le fonctionnement des servovalves des vannes de contrôle de combustible par l'établissement d'une modélisation ensuite une simulation d'un système hydraulique afin d'analyser le comportement des différentes paramètres de la servovalve, à l'aide des outils de simulation "Simulink" et "Simulationx" pour pouvoir ensuite proposer des solutions et ainsi de régler ce problème.

Description et diagnostic du système hydraulique

Chapitre 2 : Description et diagnostic du système hydraulique

2.1 Introduction

Ces dernières années, les industries traditionnelles sont passées de la technologie mécanique pure à une utilisation presque systématique de l'électronique, des ordinateurs et des technologies d'automatisation. Ainsi grâce aux systèmes hydrauliques récents, on a pu réaliser de nombreuses installations automatisées dont les performances, la fiabilité, et la robustesse ont fait leur preuve.

À l'heure actuelle, nous assistons à la fusion entre la technologie hydraulique et la technologie électronique. Cette combinaison d'équipements hydrauliques et électroniques apporte deux caractéristiques populaires : puissance et flexibilité. Par conséquent, l'utilisation de la commande proportionnelle du système hydraulique a conduit à une utilisation plus raisonnable des machines et une amélioration de leurs performances, connue aujourd'hui sous le nom de l'électrohydraulique.

Les utilisations des systèmes hydrauliques sont tellement variées qu'elles se retrouvent dans presque tous les secteurs du monde industrialisé. Ils sont conçus pour fournir la puissance, le contrôle, la sécurité et la fiabilité à l'aide d'un fluide sous pression.

2.2 Système hydraulique

2.2.1 Principe de fonctionnement

Afin de positionner les divers actionneurs hydrauliques nécessaires au fonctionnement de la turbine à gaz, l'huile hydraulique de la turbine à gaz est portée à une pression de 1600 psi. Le système de vannes, pompes, filtres, collecteurs et tubes qui propulse cette huile hydraulique à 1600 psi et la délivre ensuite au système de contrôle électro-hydraulique [JUNQUERA, 2018].

Le système est équipé de deux (2) pompes à pistons axiaux à cylindrée variable. Une pompe est requise pour un fonctionnement normal, tandis que l'autre sert de secours. Chaque pompe est commandée par une commande de compensation de pression télécommandée. Ce contrôle module le débit de refoulement pour maintenir une pression donnée à la sortie, à condition que le système en aval crée une restriction suffisante au débit.

La pompe décharge le fluide à haute pression dans un collecteur de commande de pompe conçu sur mesure. Le fluide pénètre dans le collecteur et il est automatiquement purgé d'air. Une soupape de décharge protège le système contre la surpressurisation. Le fluide passe ensuite à travers un filtre à haute pression, à travers un clapet anti-retour de sortie, puis à travers une vanne d'isolement manuel et enfin dans le collecteur de pression du système. Une soupape de dérivation manuelle permet de connecter le collecteur de pression du système au réservoir pour le démarrage et les activités de maintenance.

Lorsque la pression à la sortie de la pompe atteint le point de consigne du compensateur de la pompe, la pompe diminue son débit de refoulement afin de maintenir la pression souhaitée. Lorsque la pression chute, la pompe délivre alors plus de débit pour compenser et augmenter la pression de sortie.

Un collecteur hydraulique intégré est fourni pour exécuter les principales fonctions de commande de la pompe du système. Le refoulement de chaque pompe est connecté au collecteur.

Des filtres sous pression sont montés sur le collecteur de commande de la pompe pour filtrer le débit de refoulement de chaque pompe, un pressostat différentiel surveille la propreté du filtre et signale au système de commande lorsque l'élément doit être remplacé.

Des accumulateurs sont utilisés pour stocker le fluide à haute pression pour répondre aux exigences du système. La taille exacte et le nombre d'accumulateurs peuvent varier en fonction de la taille et des exigences de l'unité. Ils agissent également pour maintenir le système à une pression constante pendant les conditions transitoires en absorbant les pointes et en délivrant instantanément le débit avant que la pompe ne puisse répondre.

La pression du système est régie par le réglage du compensateur sur chaque pompe. Une soupape de sécurité est fournie sur chaque refoulement de la pompe pour limiter la pression maximale du système en cas de problème avec le compensateur de la pompe.

La pression dans le collecteur du système est surveillée par une série de pressostats et / ou de transducteurs de pression. Ces commandes sont utilisées pour fournir des signaux au système de commande de turbine.

2.2.2 Description générale

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 :**
Éléments 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 .

Types de circuit

Dans les systèmes hydrauliques, il existe deux (2) types de circuits :

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 [SIVARMAN, 2016, REKKIK, 2015].

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 devra être installée afin de les combler, ce qui rend ce circuit plus délicat à concevoir[SIVARMAN, 2016, REKKIK, 2015].

Dans le cas étudié, le système est ouvert, car le fluide (l'huile) est conduit vers le réservoir de départ au lieu de la pompe .

Composants des systèmes hydrauliques

La mise en place d'un système hydraulique nécessite 3 zones de base :

Zone 1 :Une Centrale hydraulique

La centrale hydraulique (appelé aussi groupe hydraulique) est un générateur de débit et pas de pression, Elle est constituée essentiellement d'un réservoir d'huile, d'un moteur ,d'une pompe, elle doit contenir aussi d'autres composants (filtre, limiteur de pression, manomètre, . . .) [BELLALAH, 2014].

1. Réservoir d'huile

Le réservoir fournit un approvisionnement interrompu en fluide au système, en sto-

ckant la quantité requise de fluide. Le fluide hydraulique est considéré comme le composant le plus important dans un système hydraulique ou en d'autres termes son cœur même.

Étant donné que le réservoir contient le fluide hydraulique, sa conception est considérée comme très critique. Le réservoir, en plus de stocker le fluide hydraulique, remplit diverses autres fonctions importantes telles que la dissipation de la chaleur à travers ses parois, le conditionnement du fluide en aidant décanter les contaminants, aider à la fuite d'air et fournir un support de montage pour la pompe et divers autres composants. Ceux-ci sont présentés en détail ci-dessous [DODDANNAVAR, 2005]. Certaines des caractéristiques essentielles de tout bon réservoir comprennent des composants tels que :

- Plaque de chicane pour empêcher le retour du fluide de pénétrer dans l'entrée de la pompe.
- Couvercle d'inspection pour l'accès à la maintenance.
- Un filtre reniflard pour échange d'air.
- Ouverture de remplissage protégée.
- Indicateur de niveau pour surveiller le niveau de fluide.
- Connexions pour conduites d'aspiration, de refoulement et de vidange.

Il existe essentiellement deux types de réservoirs :

- **Réservoir non pressurisé**

La pression dans le réservoir ne dépassera à aucun moment celle de la pression atmosphérique [DODDANNAVAR, 2005].

- **Réservoir sous pression**

Utilisé dans le cas des altitudes plus élevées où des températures et des conditions de pression plus basses sont rencontrées [DODDANNAVAR, 2005].

2. 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.

Dans le système étudié, nous avons deux filtres à haute pression (FILT-1 et FILT-2, voir figure 2.1) montés sur le collecteur de commande de la pompe pour filtrer le débit de refoulement de chaque pompe.

3. Pompes hydrauliques

Les pompes hydrauliques sont la source d'alimentation des systèmes de contrôle hydrauliques. La tâche de la pompe hydraulique est de convertir la puissance de l'arbre rotatif en énergie hydraulique qui peut être transmise de manière contrôlable en aval à d'autres dispositifs de sortie [HERBERT, 1967].

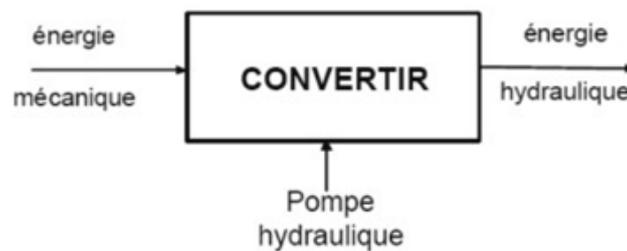


FIGURE 2.1 – Modèle fonctionnel :Pompe

On classe les pompes en deux grandes familles :

- Les pompes non volumétriques (Centrifuge)
- Les pompes alternatives (volumétriques)

Zone 2 : Les récepteurs hydrauliques

Un système hydraulique concerne généralement les activités liées au déplacement, à la préhension ou à l'application d'une force sur un objet. Les dispositifs qui atteignent ces objectifs sont appelés récepteur hydrauliques ou actionneurs.

Les actionneurs sont des composants d'interface qui convertissent la puissance hydraulique en puissance mécanique. Selon qu'un actionneur donne un mouvement de rotation ou un mouvement linéaire .

1. Moteurs Hydrauliques

Les moteurs hydrauliques sont utilisés pour transmettre la puissance des fluides par voie linéaire ou mouvement rotatif, Ils ressemblent de très près aux pompes de construction et ils entraînent des systèmes mécaniques, c'est-à-dire si le couple résistant devient trop important, la pression monte. Leur avantage c'est qu'ils développent une grande puissance pour un encombrement réduit [BOUKHOULDA, MESSAOUI, 2011]. Les moteurs sont classés en deux familles :

Les moteurs rapides

Les moteurs à palettes, les moteurs à engrenages, les moteurs à pistons axiaux, et les

moteurs à pistons radiaux.

Les moteurs lents (cylindrée élevée)

Il sont utilisés pour la transmission des puissances hydrauliques et pneumatiques

2. Les vérins

Les vérins sont des actionneurs linéaires dont la force ou le mouvement de sortie est en ligne droite. Leur fonction est de convertir l'énergie hydraulique en énergie mécanique linéaire. Les vérins hydrauliques sont en outre classés comme :

- Vérins à simple effet
- Vérins à double effet

Le système étudié comprendra des vérins de diamètres différents reliés en parallèle à un tuyau. Les bouteilles auront deux orifices séparés pour l'admission et l'évacuation des liquides. L'ensemble est ensuite partiellement rempli à l'aide d'huile hydraulique incompressible appropriée.

Le piston se présente sous la forme d'un disque plat complet avec une tige reliée au centre. Tout en appliquant une force au petit piston, il tentera de comprimer le fluide présent dans le petit cylindre.

Cela fera couler le fluide du plus petit cylindre vers le plus grand cylindre à travers les tubes connectés, et le piston du plus grand cylindre se déplacera vers le haut sous la force générée, ce qui permettra éventuellement de contrôler différentes vannes.

Zone 3 :Les éléments de liaisons

C'est une zone qui lie les 2 zones précédentes et qui est constituée des différents éléments de distribution et liaison, les accessoires et les appareils nécessaires pour les mesures et la protection du système.

1. Accumulateurs

Les accumulateurs sont des appareils entrant dans la constitution des systèmes hydrauliques. Ils sont utilisés pour stocker les réserves d'énergie et sont installés en liaison avec le circuit principal, de sorte qu'une certaine quantité de fluide peut être stockée sous une certaine pression, et restaurée (donnée) si nécessaire (par exemple, en cas de chute de pression inattendue, compensation de fuite, équilibre des forces...)[BOUJILA, 2016].

On distingue 3 types d'accumulateurs :

L'accumulateur à piston

Les deux parties de l'accumulateur sont isolées l'une et l'autre par un piston qui assure l'étanchéité.

L'accumulateur à vessie

L'azote sous pression est contenu dans une enveloppe appelée : vessie, qui isole l'huile de l'azote.

L'accumulateur à membrane

L'azote et l'huile sont séparés par une membrane élastique mais étanche. La pastille située en bas de la membrane empêche l'extrusion de celle-ci en cas de décharge brusque.

Le système étudié utilise trois (03) accumulateurs du type vessie (figure) qui stockent du fluide à haute pression avec une charge de 69 bar.

2. Échangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre sans les mélanger puisque le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides. Il existe deux principaux types d'échangeurs de chaleur à dissipation thermique :

(a) Échangeurs de chaleur à refroidissement par air

Le fluide hydraulique à refroidir est pompé à travers les tubes à ailettes. Lorsque le fluide s'écoule à travers les tubes, de l'air est soufflé dessus. Cela enlève la chaleur des tubes [HODGES, 1999].

(b) Échangeurs de chaleur à refroidissement par eau

L'eau de refroidissement est pompée dans l'échangeur de chaleur et circule autour du banc de tubes. Le fluide hydraulique, qui doit être refroidi, s'écoule à travers les tubes. En s'écoulant à travers les tubes, le fluide dégage de la chaleur dans l'eau, réduisant ainsi sa température [HODGES, 1999].

Le système étudié contient deux (02) échangeurs de chaleur à coque et à tube redondants (refroidisseur 1 et 2) sont fournis pour maintenir une température constante du fluide hydraulique dans le réservoir. Le système est conçu pour qu'un seul refroidisseur soit opérationnel tandis que l'autre sert de sauvegarde.

3. Système de conditionnement (TAFS)

Le système de conditionnement dans le système étudié utilise une pompe à boucle latérale pour éliminer l'acide et l'eau du fluide. Il est indépendant des principales pompes EHC et est conçu pour fonctionner en continu. Deux ensembles d'éléments filtrants sont utilisés dans le système de conditionnement (TAFS) (figure) qui génèrent un débit de 15GPM avec une température de 40,5C. Bien que la fonction de chaque élément filtrant soit différente, le boîtier de chaque élément est identique.

4. Contrôles de direction (Distributeurs)

Ces appareils hydrauliques sont conçus pour diriger le fluide aux endroits désirés. En même temps, ils servent de conduite de retour du fluide hydraulique au réservoir. Un distributeur permet aussi de commander le démarrage ou l'arrêt d'un actionneur hydraulique [REKKIK, 2015].

5. Le limiteur de pression ou soupape de sûreté

A pour fonction de limiter la pression dans un circuit et de faire retourner au bac le débit excédentaire. Il est monté en dérivation sur la conduite pression. Il peut être à action directe, à commande indirecte ou bien à commande pilotée.

6. Le réducteur de pression

A pour fonction de réduire la pression du réseau principal et la maintenir constante dans une partie du circuit.

7. Le limiteur ou réducteur de débit

A pour fonction de limiter ou réduire la vitesse du débit dans le circuit hydraulique afin de régler la vitesse des actionneurs lorsque la charge est fixe.

8. Manomètre

Sert à mesurer la pression en tout point ou pour mesurer la différence de pression entre deux points dans un seul tuyau ou dans deux tuyaux séparés.

Lorsqu'un manomètre est utilisé sur un circuit dans lequel la pression est sensiblement constante, le facteur d'échelle doit être de 1,5.

9. Chronomètre

Il permet de contrôler la vitesse de mouvement des équipements de la machine incriminée, par rapport aux vitesses normales.

10. Un vacuomètre

Ou indicateur de dépression, il permet de mesurer la dépression à l'alimentation des pompes mais également le fonctionnement des clapets de réalimentation de vérins par exemple.

11. Thermocouple

Un thermocouple est un capteur qui mesure la température. Il se compose de deux types de métaux différents, réunis à une extrémité. Lorsque la jonction des deux métaux est chauffée ou refroidie, une tension est créée qui peut être corrélée à la température.

12. Des vannes

Dispositifs utilisés dans les systèmes de contrôle hydraulique pour la modulation précise et le contrôle de l'ensemble du système. Dans les circuits hydrauliques contrôlés par des vannes, la vanne fournit l'interface entre l'élément de puissance hydraulique - c'est-à-dire la pompe - et le dispositif de sortie hydraulique, qui est un actionneur linéaire ou rotatif [HERBERT, 1967].

13. Un stéthoscope

Cet appareil permet de localiser rapidement les bruits et les vibrations d'un circuit hydraulique. Un tel appareil, même très rudimentaire, rend d'innombrables services et son prix est dérisoire [FAULKNER, 1999].

14. Un débitmètre

Sert à mesurer le débit dans un circuit hydraulique, il comprend principalement un cône de mesure et un piston magnétique ainsi qu'un ressort, pour maintenir le piston magnétique en position d'absence de débit [DODDANAVAR, 2005].

15. Pressostat (Pressure Switch)

Un pressostat établit ou rompt un contact électrique lorsqu'une certaine pression de consigne a été atteinte à l'entrée.

16. Thermostat (Temperature Switch)

Ou bien les interrupteurs de température, sont utilisés dans une variété de processus industriels et techniques. Si une température prédéfinie est atteinte, le commutateur de température ouvre ou ferme un contact de commutateur correspondant [DOD-DANNAVAR, 2005].

2.2.3 Schématisation du circuit

Les éléments hydrauliques tels que les cylindres et les vannes sont reliés par des canalisations pour former un circuit hydraulique ou pneumatique. Il est difficile de représenter le fonctionnement complexe de ces éléments à l'aide de croquis. Des symboles graphiques sont donc utilisés pour indiquer ces éléments.

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. La figure suivante est la schématisation de cette installation.

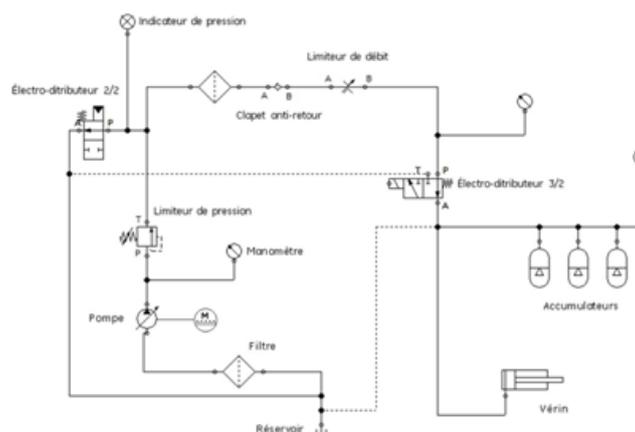


FIGURE 2.2 – Schéma du système hydraulique étudié.

Symboles des composants

La représentation graphique, la désignation et l'explication des divers composants et équipements utilisés dans les systèmes hydrauliques sont données dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 – Symboles des composants du schéma hydraulique.

	Symbole	Dénomination
Zone 1		Réservoir
		Filtre
		Pompe volumétrique à cylindre variable
		Moteur hydraulique
Zone 2		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
Zone 3		Accumulateur
		Vérin simple effet

2.3 Système d'huile hydraulique de commande

Une turbine à gaz ou à vapeur utilise deux types de systèmes hydrauliques : une unité de refroidissement et de lubrification et une unité d'huile de commande. Ils diffèrent par les tailles physiques de pression et de débit.

L'unité d'huile de commande à haute pression fournit de l'énergie hydraulique aux actionneurs des vannes de gaz ou de vapeur, qui contrôlent les positions des vannes et régulent la vitesse de la turbine. La position de la vanne contrôle le débit de gaz ou de vapeur alimentant la turbine..

Ce chapitre donne un aperçu général de la structure et de la fonction de base de ce système d'alimentation en huile hydraulique et les différentes vannes qu'il contrôle.

L'huile hydraulique, pressurisée à haute pression puis utilisée dans la turbine à gaz ou à vapeur pour fournir une puissance de fluide de commande aux :

- L'ensemble des vannes de système d'alimentation en combustible à gaz (SRV et GCV).
- L'ensemble des vannes de système d'alimentation en Vapeur (RSV,MSV,MCV ,ICV)
- L'ensemble des aubes directrices d'entrée variable (IGV).
- l'encliquetage hydraulique et le convertisseur de couple dans le système de lancement.
- Dispositifs de déclenchement hydraulique du système de protection.

2.3.1 Les vannes commandées par le système hydraulique

Les vannes de contrôle de la Turbine à Vapeur

- **Vannes d'arrêt et de commande principales HP (MSV ,MCV)**

Quatre vannes d'arrêt et de commande principales HP admettent de la vapeur dans la turbine HP. La fonction principale des vannes d'arrêt principales est de couper rapidement le flux de vapeur vers la turbine en cas d'urgence. La fonction principale des soupapes de commande est de contrôler le débit de vapeur vers la turbine en réponse au système de commande de la turbine [The Nuclear Regulatory Commission, 2017].

- **Vannes d'arrêt de réchauffage de d'interception (RSV,ICV)**

Les vannes d'arrêt de réchauffage et d'interception sont disposées entre les MSR et l'entrée de turbine IP. L'entrée de vapeur IP est contrôlée par quatre ensembles de deux vannes individuelles montées en série. Une vanne remplit une fonction de protection de la turbine (vanne d'arrêt) et l'autre, une fonction de commande et de protection (vanne d'interception). Les vannes d'arrêt de réchauffage isolent les

réchauffeurs du séparateur d'humidité des turbines basse pression [The Nuclear Regulatory Commission, 2017].

Les vannes de contrôle de la Turbine à Gaz

- **Vanne d'arrêt /rapport vitesse SRV**

Elle a le rôle de fournir un gaz sous pression calculée entre les deux vannes. La boucle de réglage de pression (la commande SPEEDTRONIC) utilise la Servosoupape électro-hydraulique pour contrôler le flux d'huile d'admission(ou dégagement) de l'huile dans le cylindre hydraulique afin de positionner la vanne de façon que la pression de gaz combustible soit celui exigé par la soupape GCV[DEL GUSTA, 2002].

- **Vanne de réglage de gaz combustible GCV**

En série avec la vanne SRV, la vanne de contrôle de gaz combustible GCV est faite pour répondre aux valeurs de vitesse et de charge en jouant sur le débit de gaz qui entre dans la section de combustion. La position de la vanne est une fonction linéaire de la tension de référence du déplacement de combustible généré par la commande SPEEDTRONIC.

La FSR actionne la servovalve électro-hydraulique par admission (ou dégagement) de l'huile dans le cylindre hydraulique pour positionner la vanne de façon que l'écoulement de gaz combustible soit celui exigé pour une situation donnée de vitesse et de charge de la turbine [DEL GUSTA, 2002].

La servovalve

La Servovalve est l'interface entre le système électrique et le système mécanique. Le signal de commande électrique appliqué sur un moteur torque de bobine va créer une force magnétique qui agit sur les extrémités du pilote de l'armature. Cette force provoque une déflexion sur l'assemblage armature clapet au niveau de tube flexible. La déflexion du clapet limite l'écoulement de fluide à travers l'injecteur en déplaçant le tiroir avec l'appui sur leur extrémité.

Vanne de déclenchement

Cette vanne (ayant deux passages d'huile) est un mécanisme de sécurité pour admettre ou interdire la commande de la vanne SRV par la Servosoupape , dans le cas normal, la soupape (actionnée par l'huile de déclenchement) permet à l'huile de commande de passer au cylindre à travers le premier passage et dans ce cas, la vanne SRV est sous la commande de la Servovalve . Le deuxième passage fait évacuer l'huile de cylindre vers la caisse qui fait positionner la vanne SRV en position de repos (complètement fermée) et dans ce cas, la

vanne SRV est hors commande de la Servovanne .

2.3.2 Les Défaits d'entretien des installations hydraulique

La maintenance des équipements hydrauliques est souvent accidentelle et non préventive et elle est liée à la mauvaise compréhension des paramètres (pression, débit, température). Enfin, des manomètres et niveaux difficilement lisibles peuvent être la cause d'accidents.

1. Fuite d'huile sous pression, défaut d'étanchéité

Les fuites et les petites fuites d'huile sous pression présentent un risque grave de blessures corporelles, telles que des brûlures (température de l'huile : : 70 °C), des lésions pulmonaires (évaporation d'huile), une irritation des yeux (émission de vapeur d'huile), et Risque de glissement (huile au sol)[Insitu Experts, 2017].

2. Rupture d'un composant du circuit

Un accident peut être dû au dysfonctionnement d'un des composants des circuits [Insitu Experts, 2017] tels que :

- L'éclatement d'un raccord.
- L'éclatement d'une tuyauterie rigide ou flexible .
- Dommages mécaniques sous l'action d'une surpression.
- L'absence de contrôle des niveaux ou de la pression.
- Manque de manomètre résistant au choc et surpression.
- Mouvement intempestif

3. Non-respect des procédures de sécurité

Dans la plupart des entreprises, des procédures de sécurité sont en place pour éviter les accidents. Cependant, ils ne sont pas toujours respectées, notamment en cas d'urgence ou de dépannage, L'absence de consignes[Insitu Experts, 2017].

4. Méconnaissance des risques liés à l'utilisation de fluide sous pression

Dans certains cas l'opérateur ignore tout simplement les risques et les règles de sécurité à respecter. Bien souvent cela est lié à une absence de formation en sécurité et en l'hydraulique en général [Insitu Experts, 2017].

5. Maintien des qualités du fluide hydraulique

Le fluide utilisé peut également être à l'origine du problème. C'est pourquoi des fluides appropriés et recommandés doivent être utilisés. En fait, ces huiles sont incompatibles ou miscibles entre elles. Enfin, il est important de ne pas ignorer la surveillance de la cartouche filtrante et le contrôle de la température du fluide. [Insitu Experts, 2017].

Conclusion

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 vanne de réglage du combustible alimentant la turbine. Lorsque cette dernière est contrôlée par une servovalve, le système devient électrohydraulique.

Dans ce qui suit, nous allons modéliser la partie dynamique du système électrohydraulique et présenter les différentes méthodes et résultats d'analyses effectués sur le fluide hydraulique, pour les employer par la suite dans la simulation du système.

Les fluides hydrauliques, Méthodes
d'analyse et analyse de l'huile du
système

Introduction

Essentiellement, un fluide hydraulique à 5 fonctions principales, qui sont la transmission de la puissance hydraulique, le graissage de toutes les pièces en mouvement, L'étanchéité, la dissipation de chaleur et la protection contre la corrosion. Le respect des performances prévues, la durée de vie, la sécurité de fonctionnement et, en définitive la rentabilité d'une installation hydraulique sont directement influencés par le choix du fluide hydraulique, il est donc important d'utiliser un fluide propre de haute qualité afin de garantir un fonctionnement efficace du système hydraulique.

3.1 Généralités sur les fluides hydrauliques

3.1.1 Fonctions et sollicitations des fluides hydrauliques

Généralement, on définit 21 caractéristiques ou qualités qu'il y a lieu de prendre en considération :

- 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, etc. ;
- Tendance au moussage, persistance de la mousse et relargage des gaz occlus ;
- Possibilité de régénération, etc. ;

Cependant, la liste ci-dessus n'est pas exhaustive et les critères de sélection de l'huile hydraulique doivent également tenir compte des caractéristiques et de l'environnement de l'équipement.

Les huiles que nous utiliserons sont isotropes, c'est-à-dire qu'elles ont les mêmes caractéristiques dans toutes les directions spatiales. Ils seront également mobiles, c'est-à-dire qu'ils n'auront pas leur propre forme : ils occuperont la forme du récipient qui les contient, ou ils couleront. [DALLEMAGNE, 1999a].

Caractéristiques de viscosité

Un fluide de viscosité mal adaptée peut entraîner des ennuis plus ou moins graves tels que glissement de la pompe, usure par augmentation du frottement, fuite, etc..

Une viscosité trop forte crée un frottement interne plus grand, augmente la température et accroît la consommation de puissance. Une viscosité trop faible favorise les fuites, elle peut entraîner un glissement de la pompe se traduisant par une perte de rendement, une augmentation de la température et de l'usure des pièces en mouvement [DALLEMAGNE, 1999a].

Résistance à la dégradation

Les huiles hydrauliques destinées à fonctionner à des températures élevées doivent présenter une excellente stabilité thermique et une bonne résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse. Les fluides chauffés ne doivent pas produire rapidement de substances parasites excessives, telles que des boues, des vernis et des substances 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 des fluides peut également être indiquée par des produits de décomposition gazeux, qui peuvent être la cause de la cavitation. En fait, ce phénomène de cavitation est susceptible 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 présence d'oxygène accélère la dégradation thermique. Dans un circuit hydraulique fonctionnant à haute température, tout est mis en œuvre pour éviter le contact avec l'air. Cependant, comme il y a toujours une certaine quantité d'oxygène dissous dans le fluide, il est difficile d'éviter tout contact. D'autre part, cet oxygène a non seulement un effet nocif, car il forme un film d'oxyde protecteur avec certains métaux, ce qui contribue à lubrifier et à prévenir la corrosion.

L'eau est comme l'oxygène. En installant des trous de ventilation dans le réservoir de stockage qui peuvent empêcher l'humidité, il est facile de se protéger contre l'intrusion d'eau, mais dans le système hydraulique étendu, le fluide ne peut pas être complètement exempt d'eau. Par conséquent, la résistance à l'hydrolyse doit être prise en compte lors du

choix de l'huile hydraulique. [DALLEMAGNE, 1999a].

Pouvoir lubrifiant

Pour assurer avec succès sa fonction, l'huile hydraulique doit pouvoir lubrifier correctement toutes les pièces mobiles et minimiser les frottements. Selon les conditions rencontrées dans le système hydraulique, la lubrification peut être effectuée dans un état hydrodynamique ou en régime permanent, et la qualité de lubrification du fluide doit être ajustée en conséquence. Un aspect qui affecte le niveau de performance est le type de pompe et l'autre est la pression de fonctionnement. [DALLEMAGNE, 1999a].

Corrosion

La corrosion peut se produire en raison de l'interférence du fluide avec le système hydraulique. Trois types de corrosion peuvent survenir : [DALLEMAGNE, 1999a] :

- La corrosion électro- chimique,
- La corrosion érosive
- La corrosion fissurante sous contrainte.

3.2 Classification des fluides hydrauliques

De nombreux liquides ont été testés pour une utilisation dans les systèmes hydrauliques. Actuellement, les liquides utilisés comprennent l'huile minérale, l'eau, les esters de phosphate, les composés d'éthylène glycol à base d'eau et les fluides de silicone. Suivant le type d'application, trois grandes familles de fluides hydrauliques sont utilisées :

- **Les huiles hydrauliques minérales** : Elles sont Issues d'un mélange d'hydrocarbures (paraffine, oléfine, naphtène et aromatique) et obtenues par distillation lors du raffinage du pétrole brut, ces huiles sont volatiles et donc toxiques. On leur ajoute certains additifs pour leur procurer des qualités anti-usure et augmenter leurs tenue aux charges. Elles possèdent en outre 90 % d'eau pour les rendre difficilement inflammables [DODDANNAVAR, 2005].

Les Huiles difficilement inflammables (fluides aqueux ou synthétisés) : Les fluides hydrauliques à base d'eau les plus largement utilisés peuvent être classés comme des mélanges eau-glycol et des mélanges de base eau-synthétique. Le mélange eau-glycol contient des additifs pour le protéger de l'oxydation, de la corrosion et de la croissance biologique et pour améliorer sa capacité de charge [DODDANNAVAR, 2005].

Les Huiles difficilement inflammables (fluides non aqueux) : Elle sont des huiles à base de pétrole qui contiennent la plupart des propriétés souhaitées d'un liquide hydraulique. Cependant, elles sont inflammables dans des conditions normales et peuvent devenir explosifs lorsqu'ils sont soumis à des pressions élevées et à une source de flammes ou de températures élevées [DODDANNAVAR, 2005].

3.3 Propriétés du fluide hydraulique

La masse volumique, la viscosité, ainsi que le module de compressibilité sont des propriétés physiques du fluide qui seront présentées dans cette section.

3.3.1 La masse volumique

La masse volumique d'un fluide ρ (kg/m³) est le ratio de la masse M par unité de volume V.

$$\rho = \left(\frac{M}{V} \right) \quad (3.1)$$

La masse volumique d'un fluide est déterminée par sa consistance par rapport à son état de température et de pression. Elle diminue avec l'augmentation de la température mais augmente avec l'augmentation de la pression [FAULKNER, 1999]. La masse volumique des huiles varie dans d'assez grandes proportions dont on peut les distinguer dans le tableau suivant qui présentes les différentes huiles hydrauliques ainsi et leurs masse volumique

Tableau 3.1 – Masses volumiques des principales huiles

Types d'huiles	Masse volumique kg/m ³
Huiles minérales utilisées en aéronautique	860 à 900
Huiles pour automobiles	≈ 900
Huiles à base minérale semi-synthétiques ou synthétiques classiques	850 à 920
Huiles de synthèse de type polyglycol	≈ 1000
Fluides synthétiques difficilement inflammables	>1000

Influence de la température sur la masse volumique

La variation de volume est reliée à la variation de température DT par la relation :

$$\Delta V = V\alpha\Delta T \quad (3.2)$$

On peut adopter comme coefficient moyen de dilatation α des huiles minérales la valeur :

$$\alpha = 7 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C} \quad (3.3)$$

Sous la pression atmosphérique normale et à la température T, la masse volumique est :

$$\rho = \rho_{15}/[1 + \alpha(T - 15)] \quad (3.4)$$

Avec, ρ_{15} masse volumique à 15 °C

La figure 3.1 représente graphiquement la variation de la masse volumique en fonction de la température.

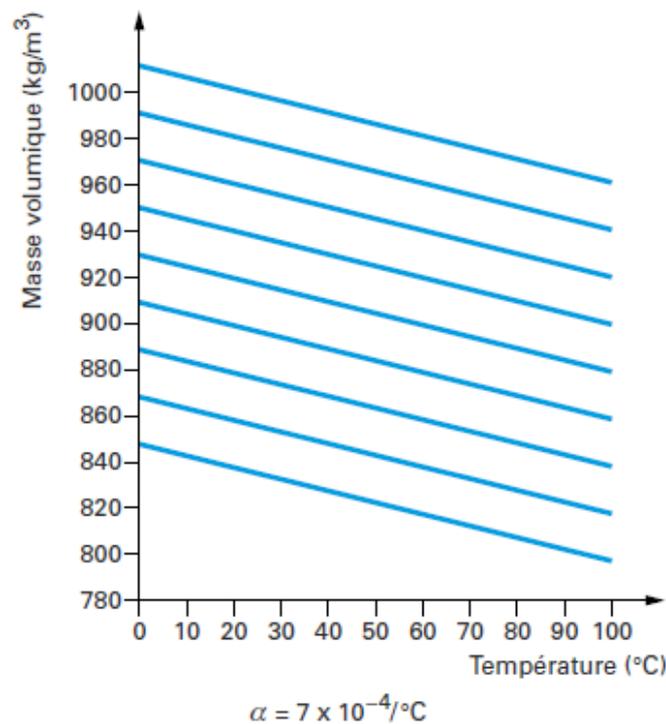


FIGURE 3.1 – Variation de la masse volumique d'une huile avec la température.

Influence de la pression sur la masse volumique

La compressibilité des huiles minérales pures est faible mais, Elle ne peut pas être négligeable dans des applications à haute pression. Quand une huile minérale est mise sous pression à une température constante, le volume diminue avec l'augmentation de la pression suivant la relation [DALLEMAGNE, 1999b] :

$$\Delta V = V\beta\Delta P \quad (3.5)$$

Avec, β coefficient de compressibilité.

Le module de compressibilité est définie par le rapport :

$$K = 1/\beta \quad (3.6)$$

Donc, la masse volumique varie suivant la relation :

$$\rho = \frac{\rho_{15}}{1 - \beta\alpha P} \quad (3.7)$$

La figure 3.2 représente graphiquement la variation de la masse volumique en fonction de la pression.

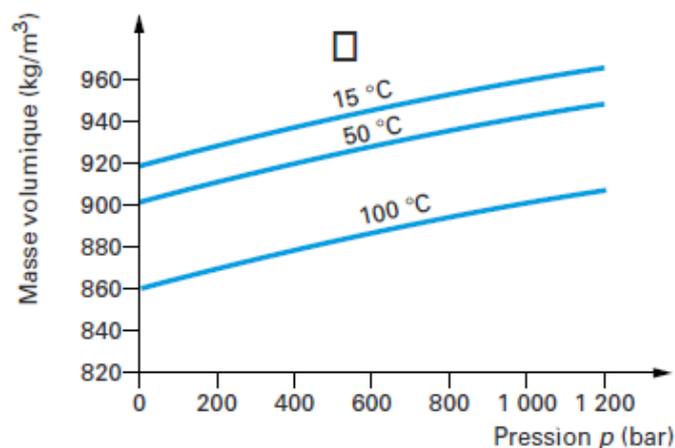


FIGURE 3.2 – Variation de la masse volumique d'une huile avec la pression.

3.3.2 Viscosité

la viscosité est une propriété importante du fluide lors de l'analyse du comportement et du mouvement du fluide près des frontières solides. La viscosité d'un fluide est une mesure de sa résistance à la déformation progressive par contrainte de cisaillement ou contrainte de traction. La résistance au cisaillement dans un fluide est causée par le frottement intermoléculaire exercé lorsque des couches de fluide tentent de glisser les unes par rapport aux autres DODDANAVAR [2005].

La viscosité d'un fluide est affectée par les changements de température et de pression. Lorsque la température du liquide augmente, sa viscosité diminue. C'est-à-dire qu'un liquide s'écoule plus facilement lorsqu'il est chaud que lorsqu'il est froid. La viscosité d'un liquide augmentera à mesure que la pression sur le liquide augmentera [FAULKNER, 1999].

Un fluide satisfaisant pour un système hydraulique doit être suffisamment épais pour donner une bonne étanchéité aux pompes, moteurs, vannes, etc.

Viscosité dynamique

La viscosité dynamique est une grandeur physique qui caractérise la résistance à l'écoulement laminaire d'un fluide incompressible. Elle est fortement dépendante de la température. Les fluides peuvent être classés en deux catégories : les fluides dits « non newtoniens » et les fluides dits « newtoniens », ces derniers ont une viscosité dynamique indépendante du gradient de vitesse.

La viscosité dynamique est la viscosité la plus adaptée dans les calculs. Elle est caractérisée par un coefficient η qui se définit comme le facteur de proportionnalité entre la tension tangentielle [DALLEMAGNE, 1999a]

$$F/S = \eta dv/dx \quad (3.8)$$

Avec, F/S : gradient de la vitesse dv/dx : tension tangentielle.

Cette relation est dite formule de Newton et les liquides dont l'écoulement obéit à cette loi, sont dits liquides newtoniens. Lorsque la température et la pression de ces liquides sont fixes, la viscosité η reste constante c-à-d elle ne dépend pas de F . La contrainte de cisaillement τ s'écrit :

$$\tau = F/S \quad (3.9)$$

et la vitesse de cisaillement s'exprime par la relation :

$$\dot{\gamma} = dv/dx \quad (3.10)$$

On remplaçant (4.9) et (3.10) dans la relation (4.8), elle devient :

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (3.11)$$

Ce qui nous donne

$$\eta = \tau/\dot{\gamma} \quad (3.12)$$

Viscosité cinématique

La plupart des calculs en hydraulique impliquent l'utilisation de la viscosité cinématique plutôt que la viscosité absolue. La viscosité cinématique est une mesure du temps requis pour qu'une quantité fixe d'huile s'écoule à travers un tube capillaire sous la force de la gravité. La viscosité cinématique peut également être défini comme le quotient de la viscosité dynamique par la masse volumique du fluide. Elle peut être mathématiquement représentée comme [DALLEMAGNE, 1999a] :

$$\nu = \mu/\rho \quad (3.13)$$

La relation Viscosité-Température

La viscosité dépend fortement de la température. À l'extrême, à des températures élevées, un fluide peut ne plus avoir une viscosité suffisante pour former un film d'une résistance adéquate entre les surfaces en mouvement, tandis qu'à des températures froides, il peut devenir trop visqueux pour s'écouler. La viscosité d'un liquide diminue avec l'augmentation de la température ; contrairement aux gaz qui ont la relation opposée [FAULKNER, 1999].

Une relation empirique qui relie la viscosité à la température (Walther equation) peut être exprimés par :

$$\log^2(\nu + \alpha) = b \cdot \log T + c \quad (3.14)$$

Avec, η : La viscosité dynamique T : La température absolue $\alpha \approx 0.8$

b et c : Constantes de fluide

L'équation de Walther constitue la base des diagrammes de viscosité standard, permettant de tracer des données viscosité-température sous forme de lignes droites pour les fluides newtoniens. La représentation graphique des relations viscosité-température de cette manière est évidemment la base la plus pratique pour considérer la variation de viscosité d'un fluide sur une large plage de températures 3.4

La relation Viscosité-Pression

Tout comme la viscosité varie avec la température, elle varie également avec la pression, mais dans ce cas, la viscosité augmente avec l'augmentation de la pression. En 1893, Barus a décrit une relation empirique viscosité-pression isotherme dans laquelle la viscosité augmente de façon exponentielle avec la pression [FAULKNER, 1999] :

$$\eta_p = \eta_0 e^{p\alpha} \quad (3.15)$$

Avec η_p : Viscosité à pression p η_0 : Viscosité à pression atmosphérique

α : Coefficient viscosité-pression

Les relations viscosité-pression pour les liquides sont normalement exprimées par le coefficient de pression-viscosité α dans l'Eq.(3.15). Une meilleure formulation du coefficient provient du réarrangement de l'Eq.(3.15) à

$$\ln\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right) = \alpha p \quad (3.16)$$

Cela indique que le coefficient viscosité-pression est le changement de viscosité par rapport au changement de pression. Des valeurs plus élevées de α prédisent un liquide plus visqueux

lorsque la pression augmente. La figure 3.4 représente graphiquement la variation de la masse volumique en fonction de la pression.

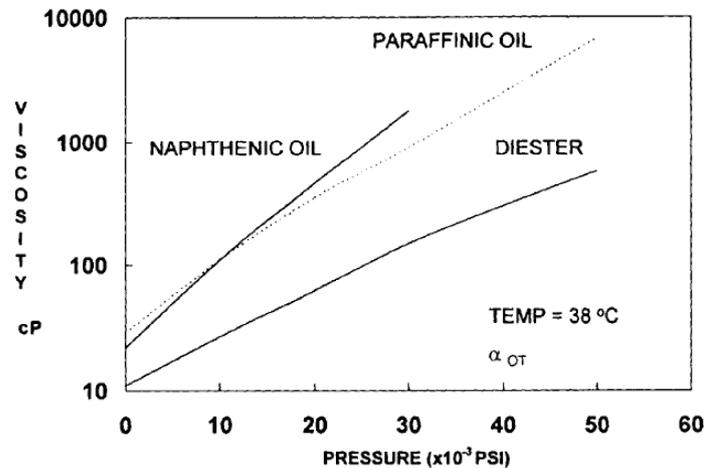


FIGURE 3.3 – Propriétés de viscosité-pression de divers liquides.

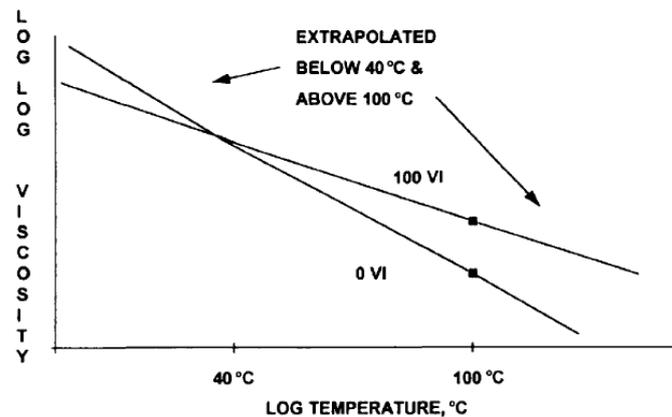


FIGURE 3.4 – Propriétés viscosité-température des liquides à indice de viscosité élevé et faible.

3.3.3 Module d'élasticité isostatique

Le module d'élasticité isostatique d'un fluide est un terme utilisé pour décrire la compressibilité du fluide. En réalité, ce module est inversement proportionnel à la compressibilité.

Le but d'un système hydraulique est d'augmenter l'énergie potentielle du système en augmentant la pression du fluide. Cette énergie potentielle peut ensuite être convertie en énergie cinétique qui fera un travail utile. Cependant, un fluide à faible module de d'élasticité isostatique sera très compressible et l'énergie nécessaire pour élever la pression devra également être suffisante pour comprimer le fluide.

La plupart des fluides hydrauliques ont un module d'élasticité isostatique très élevé à l'état vierge. Cependant, en présence d'air, le module d'élasticité sera faible et le fluide du système devra absorber la chaleur générée lors de la compression [DODDANNAVAR, 2005] [FAULKNER, 1999].

Le module de volume est donné par l'équation suivante :

$$\beta = -V \left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right) \quad (3.17)$$

Avec V : Le volume d'origine ΔP : Différence de pression ΔV : Différence de volume

3.4 Analyses d'huile du système actuel

D'une manière générale, tous les systèmes hydraulique sont susceptibles d'être surveillés dans leur fonctionnement par analyse de leur huile en service. Les résultats permettent de détecter des anomalies caractéristiques telles que :

- la contamination par des particules internes à l'équipement
- l'évolution par comparaison des résultats obtenus entre chaque analyse
- le type d'usure
- la pollution par des agents extérieurs entraînant une détérioration du lubrifiant et/ou une usure par abrasion (poussière atmosphérique)

En tout état de cause, une attention particulière doit être portée sur le stockage des huiles neuves d'une part et sur la technique d'échantillonnage d'autre part.

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats des essais réalisés sur des échantillons d'huile hydraulique neuve et ancienne qu'on va ensuite utiliser dans notre simulation. Ces analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire de l'École Nationale Polytechnique et le laboratoire de ILAC MRA.

3.4.1 Analyses physico-chimiques

1. L'indice d'acide TAN (Total Acid Number)

Les valeurs de la teneur en eau ont été déterminées par la méthode de Karl Fischer au niveau du laboratoire ILAC MRA. Il permet de vérifier le niveau d'acidité du lubrifiant, de déterminer l'oxydation de l'huile, la présence de certains contaminants et l'épuisement en antioxydant et anticorrosion de l'huile (Voir annexe).

L'indice d'acide d'un corps gras (ex : l'huile hydraulique de notre système) est la quantité de potasse KOH en mg nécessaire pour neutraliser l'acidité libre contenue dans 1g de ce corps gras (exprimé en mg KOH/g).

(a) Principe de fonctionnement

Lorsqu'on dissout notre huile hydraulique dans le solvant, le pH devient acide puisque les fonctions acides se détachent de l'huile. L'ajout de KOH va rendre le pH neutre puisqu'il va neutraliser petit à petit toutes les fonctions acides.

C'est la phénolphthaléine qui va nous permettre de voir à quel moment toutes les fonctions sont neutralisées : cet indicateur coloré est incolore en milieu acide, et vire au rose en milieu basique. Au moment où le virage a lieu, c'est donc que tous les acides ont été neutralisés. On obtient un volume de chute de burette, grâce auquel on va pouvoir calculer l'indice d'acide.

(b) Mode opératoire

- Dans un erlenmeyer de 250 mL, une masse $m = 10$ g d'huile est mesurée précisément.
- 20 mL d'éthanol et 20 mL d'ether éthylique sont ajoutés pour permettre la dissolution de l'huile, (le solvant)
- Quelques gouttes de l'indicateur coloré phénolphthaléine sont ajoutées.
- Le mélange est agité pour qu'il soit bien homogénéisé.
- Le dosage du mélange contenu dans l'erlenmeyer est réalisé par une solution S de potasse alcoolique (hydroxyde de potassium en solution dans l'éthanol) de concentration 0,2 mol/L.
- Le virage de l'indicateur est obtenu pour un volume d'hydroxyde de potassium versé (apparition de la couleur rose fuchsia)
- (C) **Interprétation des résultats**

$$TAN_{mg\ KOH/g} = \frac{V_{titrant(l)} \times C_{titrant(\frac{mol}{L})}}{n_e\ titrant \times m_{huile(g)}} \times M_{KOH(\frac{g}{mol})} \quad (3.18)$$

$$TAN_{mg\ KOH/g} = \frac{V_{titrant(l) \times 0.2}}{n_{e\ titrant} \times 1} \times 56.11 \quad (3.19)$$

Les essais ont été réalisés sur deux échantillons d'huile nouvelle et ancienne(en service) et les résultats sont introduits dans le tableau suivant :

Tableau 3.2 – Résultats des essais de l'indice d'acidité

Huile	$V_{titrant}$ (ml)	TAN
Nouvelle	4.54	0.05
Usée	42	0.47

En effectuant des essais d'indice d'acide sur notre huile neuve et contaminé on a remarqué une hausse significative de la valeur de TAN de notre huile usée . La valeur d'indice d'acide peuvent être utilisés comme indicateur des niveaux d'oxydation dans les huiles . Plus la valeur d'indice d'acide est élevée, plus le niveau de dégradation de l'huile est important. De plus, l'indice d'acide augmente avec l'âge d'une huile (le cas de l'huile usée), car les triglycérides sont convertis en acides gras et en glycérol sous l'effet du temps.

De façon générale, la valeur d'indice d'acide est une mesure des ingrédients organiques acides qui sont présents dans les huiles . Pour une huile usagée, la valeur d'indice d'acide augmente à cause du processus d'oxydation qui se produit pendant l'entretien de l'huile hydraulique .L'huile de notre système est utilisé dans plusieurs machines rotatifs qui peuvent être soumis à des températures élevées, qui sont susceptibles d'accélérer le processus d'oxydation.

2. Viscosité

La viscosité a été déterminé par l'utilisation d'un viscosimètre à chute de bille au niveau du laboratoire de l'École Nationale Nolytechnique, et par manque d'appareillage , il était impossible d'utiliser d'autre méthodes d'analyse afin de pouvoir comparer les résultats obtenu.

(a) Viscosimètre à chute de bille

Le viscosimètre à chute de bille est basé sur le principe de mesure d'Höppler. Il permet une mesure simple et précise de la viscosité dynamique de fluides newtoniens. Le concept de base est de chronométrer le temps de chute d'une bille soumise à son propre poids dans un tube incliné rempli d'échantillon de notre fluide hydraulique à tester.

Le tube est monté sur un pivot à roulement à billes qui autorise une rotation à 180 du tube, permettant ainsi de démarrer immédiatement un nouveau test.

Trois mesures sont effectuées puis un temps moyen de chute est retenu.

(b) **Mode opératoire**

- le tube qui tombe avec le liquide étudié est remplis et la balle est mis avec précaution.Plus de liquide et ajouté jusqu'à ce qu'aucune bulle d'air ne soit visible.Ensuite le tube tombant est fermé par son capuchon.
- Avant de commencer la mesure, il est préférable de tourner le tube tombant de haut en bas au moins une fois afin d'améliorer l'uniformité de la température le long du tube.
- Le tube est tourné à 180 degrés.Le chronomètre est commencé lorsque la balle atteint les premières marques sur le tube et le temps est mesuré entre les deux marques. Pour des résultats meilleurs et plus précis, il est recommandé de répéter la mesure 10 fois à chaque température.
- Après avoir changé la température du bain, il est fortement recommandé d'attendre au moins 20 minutes pour garantir la stabilité de la température de l'échantillon.
- À la fin de l'expérience,le tube est vidé du liquide et la balle est retiré du tube très soigneusement.Le tube est nettoyé avec un solvant approprié et / ou une brosse.
- La densité du liquide et de la balle sont notées respectivement.Le temps moyen «t» pour chaque température et la viscosité sont donc calculés

(c) **Interprétation des résultats**

Les essais ont été réalisés sur deux échantillons d'huile nouvelle et ancienne(en service) et les résultats sont introduits dans les tableaux suivants :

Tableau 3.3 – Résultats des essais de viscosité de l'huile neuve

Température (°C)	Viscosité (mm²/s)
45	38.1
57	21.4
72	11.9

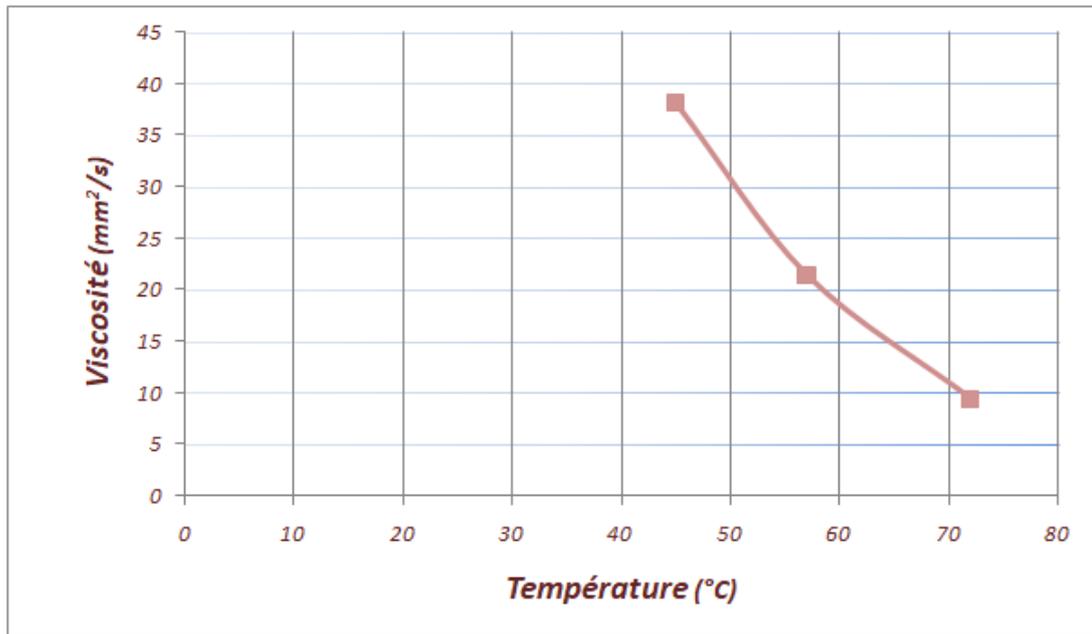


FIGURE 3.5 – Interprétation des essais de viscosité de l'huile neuve

Tableau 3.4 – Résultats des essais de viscosité de l'huile ancienne

Température (°C)	Viscosité (mm ² /s)
45	39.9
57	25.8
72	13,5

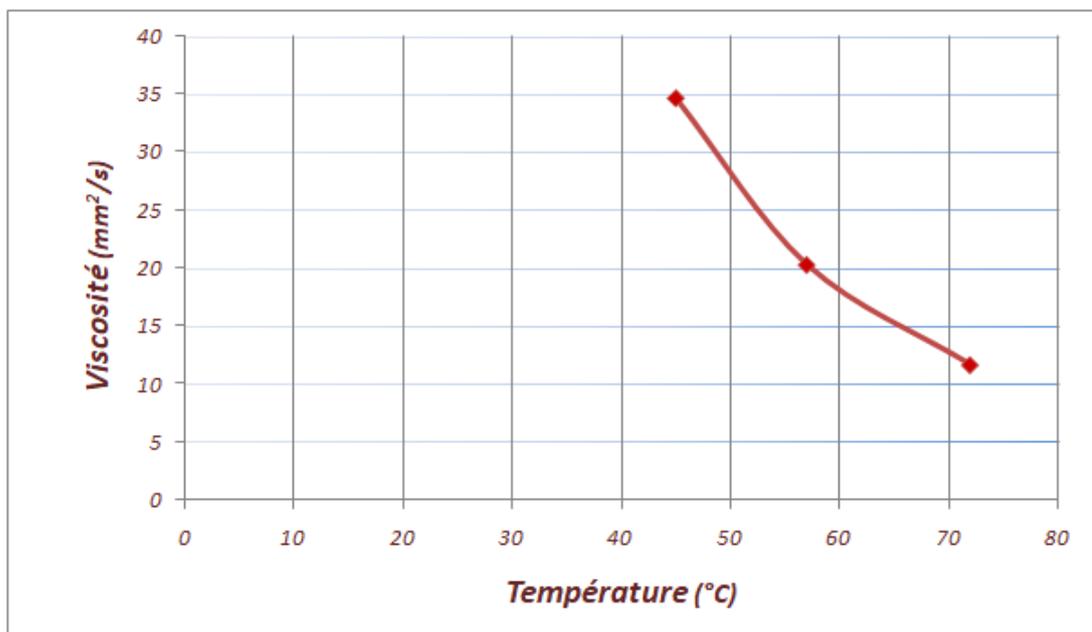


FIGURE 3.7 – Interprétation des essais de viscosité de l'huile fournie par le fabricant

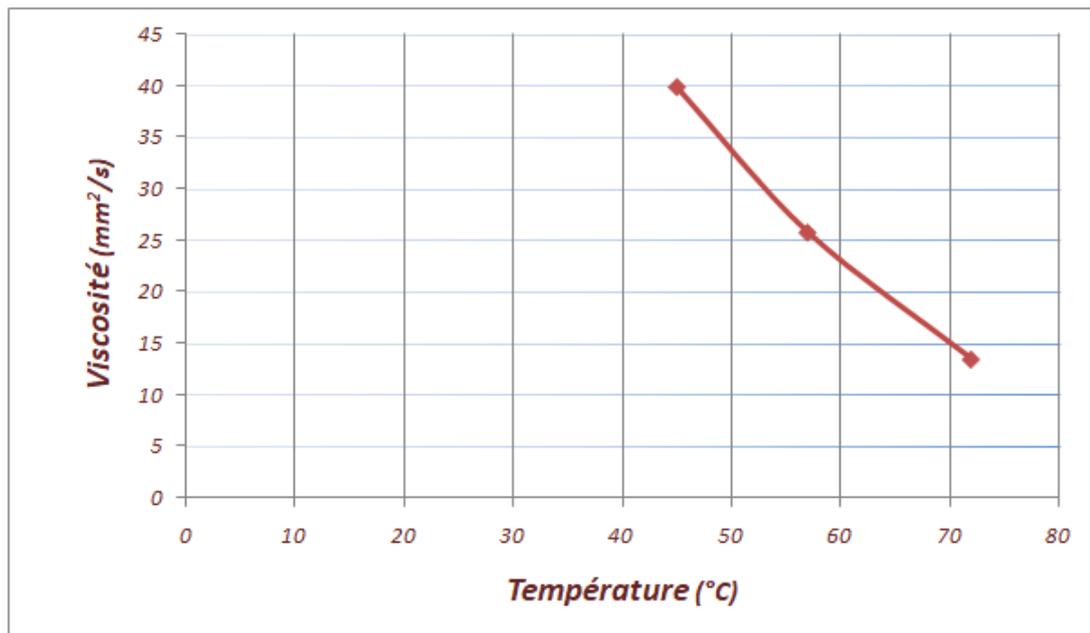


FIGURE 3.6 – Interprétation des essais de viscosité de l'huile ancienne

Tableau 3.5 – Résultats des essais de viscosité de l'huile fournie par le fabricant

Température (°C)	Viscosité (mm ² /s)
45	34.6
57	20.3
72	11.7

D'après l'analyse de la viscosité faite sur notre huile hydraulique neuve et contaminée on a remarqué que la viscosité de notre huile neuve n'est pas identique à celle fournie par le constructeur, une augmentation remarquable est constatée dans ce paramètre, en comparant les résultats de l'huile neuve avec celle usée on constate que la viscosité d'huile a augmenté après son utilisation. La viscosité d'une huile augmente en fonction d'un certain nombre de raisons, notamment de la polymérisation, de l'oxydation, de la perte de fractions légères par évaporation et de la formation de substances insolubles d'oxyde et de carbone. Les contaminants tels que l'eau, l'air, suie, antigel et l'ajout d'une mauvaise huile, peuvent également faire augmenter la viscosité d'une huile [EVANS, 2016].

La formation de substances insolubles d'oxyde et de carbone est également liée à l'oxydation. Une utilisation sous haute température peut provoquer la formation de différents composés insolubles dans l'huile, une utilisation sous température élevée

peut également provoquer une dégradation thermique de l'huile, en l'absence d'oxygène. Comme cela a déjà été mentionné, l'huile de base est constituée de différents composés étroitement apparentés.

Ces composés sont de volatilités différentes (points d'ébullition). Si une huile est soumise à des températures élevées sur une longue durée, mais sans que ces températures ne soient très élevées, les composants à bas point d'ébullition s'évaporeront. Ce phénomène est connu sous le nom de « perte de fractions légères » [EVANS, 2016] .

Les contaminants jouent également un rôle dans l'augmentation de la viscosité. L'eau est peut-être d'une viscosité plus faible que l'huile, mais quand elle se mélange à l'huile, elle peut réagir avec l'huile de base, plus important encore, avec les additifs. Des émulsions stables peuvent se former, créant des composés augmentant la viscosité de l'huile. L'eau est également une autre source d'oxygène, susceptible de favoriser l'oxydation dans les circonstances adéquates.

La réaction de l'eau avec l'huile et les additifs, est connue sous le nom d'hydrolyse. Une petite mais mesurable quantité d'eau va effectivement se dissoudre dans l'huile, puis des émulsions apparaîtront et enfin l'eau libre sera visible dans l'huile.

3. Masse volumique

Nous avons déterminé les différentes valeurs de la masse volumique sur deux échantillons d'huile neuve et ancienne par l'utilisation du pycnomètre au niveau du laboratoire de l'École Nationale Polytechnique, et par manque d'appareillage , il était impossible d'utiliser d'autre méthodes d'analyse afin de pouvoir comparer les résultats obtenus (Voir Annexe).

(a) Mesure au pycnomètre en verre

Il est généralement composé de deux éléments en verre s'assemblant précisément par un joint en verre rodé :

- une fiole de Volume $V = 28,381$ ml.
- un bouchon percé d'un tube très fin .

Lorsque l'on ajuste le bouchon sur la fiole, le trop-plein de liquide s'échappe par l'extrémité supérieure du tube et, dans la mesure où ce tube est très fin, le volume de liquide est déterminé avec une grande précision.

(b) Mode opératoire

- Le pycnomètre est posé sur la balance pour pesé et vidé.
- Le lot l'huile hydraulique à tester est introduite dans le pycnomètre
- Le lot est posé(m_1)
- Les essais sont répétés pour confirmer les résultats. La différence entre ces deux masses ($M_2 - M_1$) divisée par le volume de la fiole V donne la masse volumique de l'échantillon.

(c) **Interprétation des résultats**

Les essais ont été réalisés sur deux échantillons d'huile nouvelle et ancienne(en service) et les résultats sont introduits dans les tableaux suivants :

Tableau 3.6 – Résultats des essais de masse volumique sur l'huile neuve et en service

Huile	M₁(g)	M₂ (g)	La masse volumique (M₂. M₁)/V (g/ml)
Fabricant	15 .023	47.129	1.15
Neuve	15 .023	47.129	1.1312
En service	15.023	47.284	1.1367

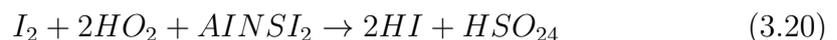
les résultats de la masse volumique révèlent une dissemblance entre la valeur de cette caractéristique de l'huile neuve mesurée et celle fournie par le constructeur,d'un autre coté Une augmentation dans la valeur de la masse volumique de l'huile en service est remarqué.Les causes de cet augmentation sont les mêmes causes d'augmentation de la viscosité de l'huile en service : moteur surchargé, produits d'usure, poussière, erreur d'appoint, oxydation, polymérisation des molécules d'huile.

4. **Teneur en eau**

Les valeurs de la teneur en eau on été déterminé par la méthode de Karl Fischer au niveau du laboratoire ILAC MRA

(a) **Méthode de karl Fischer**

Il y a deux méthodes primaires de titration de KF, à savoir volumétrique et coulométrique, la différences ces deux est la méthode d'introduction de l'iode pour la titration.. La titration de KF est très rapide et détaillé, déterminant seulement l'eau sous les formes libres et attachées.Elle est basée sur l'oxydation de l'anhydride sulfureux par l'iode avec la consommation de l'eau dans une solution tampon :



La titration atteint son point final quand l'agent de titration a réalisé un volume suffisamment pour réagir le montant total de l'eau dans l'échantillon.

(b) **Mode opératoire**

- La cellule de mesure du titrateur est remplie avec le solvant de karl fischer en appuyant sur le point de démarrage de la pompe à air et en maintenant la touche de remplissage jusqu'à atteindre le volume minimum mentionné sur le bécher de la cellule de mesure
- Le volume livré correspond apparaît à l'écran à 50ml .
- La burette est remplie avec le titrant correspondant en garantissant qu'il sera charger dans tout le tuyau d'aspiration à travers la burette continué jusqu'au tuyau de distribution et se termine à la pointe de dosage de cellule de mesure puis une vérification d'absence de fuites de titrant se fait .
- l'agitateur magnétique est activé manuellement puis le remplissage s'arrête .
- une fois cette procédure est terminée, la méthode de travail est sélectionnée
- la dérive de l'analyse avant titrage entre alors dans un mode en attente et le bouton d'analyse est activé ou l'échantillon à analyser doit être introduit en haute de la cellule de mesure
- Pour introduire l'échantillon d'huile dans le titrateur ,une seringue a aiguille et une balance analytique y seront nécessaires
- Un petit échantillon est titré pour rincer l'intérieur de seringue puis jeté le dans un bêche à déchets
- La seringue est remplies une autre fois avec un l'échantillon d'huile en éliminant toute bulle d'air présente
- La seringue est placée dans une balance pour la pesée
- Quelques gouttes d'huile sont injectées en introduisant l'aiguille dans la cellule de mesure à travers un septum
- L'aiguille est retiré et la seringue est repesée
- Un nombre négative apparaît est celui introduit dans le titrateur
- Le bouton ENTRER est appuyé pour commencer la titration
- Le point final de titrage est atteint lorsque l'instrument détecte de l'iode n'ayant pas réagi.
- Les résultats sont rapportés en pourcentage d'eau ou en parties par million (ppm)

(c) **Interprétation des résultats**

Les essais ont été réalisés sur deux échantillons d'huile nouvelle et ancienne (en service) et les résultats sont introduits dans le tableau suivant

Tableau 3.7 – Résultats des essais de la teneur en eau par KF

Teneur en eau (ppm)		
Huile de fabricant	Huile neuve	Huile en service
400	776.4	828.1

Les résultats de la teneur en eau obtenus montrent une différence significative entre la teneur en eau de l'huile neuve mesuré au laboratoire et celle donnée par le constructeur et aussi Une augmentation dans cette valeur est détectée après l'utilisation de notre huile , ce qui signifie inévitablement la présence d'eau dans notre système qui peut provenir de diverses sources. Des exemples de pénétration dans l'environnement sont les fuites de pluie dans les réservoirs externes, les infiltrations à travers les couvercles des réservoirs, les panneaux d'accès, les respirateurs ou les joints usés et la condensation de l'air dans les réservoirs et autres zones du système [AYEL, 1998].

L'eau peut également pénétrer dans le système de fluide par le côté process, par des échangeurs de chaleur ou des refroidisseurs qui fuient, par une entrée directe d'eau de process, comme l'eau de refroidissement, l'eau de lavage ou la vapeur, ou bien par une entrée indirecte d'eau a travers des réactions chimiques comme l'oxydation .

3.4.2 Analyses spectrométriques

1. La spectroscopie élémentaire

Une technique de détection et de quantification d'éléments métalliques dans une huile usée résultant de l'usure, de la contamination et des additifs. L'échantillon d'huile est excité pour que chaque élément émette ou absorbe une quantité quantifiable d'énergie, ce qui indique la concentration des éléments dans l'huile.

Les résultats reflètent la concentration de tous les métaux dissous (des emballages d'additifs) et des particules. Ce test est l'épine dorsale de tous les outils d'analyse d'huile sur site et hors site, car il fournit des informations sur la contamination et l'état d'usure de la machine de manière relativement rapide et précise. Sa principale limitation est que son efficacité de détection des particules est médiocre pour les particules de 5 microns ou plus.

(a) Interprétation des résultats

Les essais ont été réalisés sur deux échantillons d'huile nouvelle et ancienne (en service) et les résultats sont introduits dans le tableau suivant :

Tableau 3.8 – Résultats des essais de la spectroscopie

Teneur en métaux d'Usure (ppm)	Huile en service	Huile neuve
Fer	3.9	4.6
Chrome	0.5	0.5
Plomb	0.5	0.0
Cuivre	386.6	399.9
Étain	3.8	0.0
Aluminium	0.0	0.0
Nickel	0.0	0.0
Argent	0.0	0.0
Molybdène	5.0	5.3
Titane	0.0	0.0
Vanadium	0.3	0.2
Cadmium	0.0	0.0

Les résultats des essais spectroscopique indique une forte usure soudaine du fer et du cuivre dans l'huile de notre système après son utilisation ,cette diminution est expliquée par la réaction d'oxydation qui résulte principalement de l'action simultanée d'oxygène moléculaire et de la forte température en présence de ces métaux. [FAULKNER, 1999] [AYEL, 1998].

Conclusion

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

Nous prenons comme référence les caractéristiques de l'huile neuve et les analyses effectuées par GE . 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 importantes que celle de la deuxième, vu que la viscosité de l'huile augmente par oxydation ou par une contamination d'eau, ce qui est tout à fait logique ,car ces derniers ont été confirmés par une augmentation de l'indice d'acide et de la teneur en eau (si un changement affecte l'un de ces paramètres ceci provoquera le changement des autres paramètres en diminution ou bien en augmentation).

Modélisation du système électrohydraulique

Chapitre 4 : Modélisation du système électrohydraulique

4.1 Introduction

La combinaison de la technologie électronique et de la technologie hydraulique a conduit à de nombreux systèmes de contrôle puissants et précis, économisant ainsi beaucoup d'énergie et d'argent. Le concept s'applique aux systèmes électrohydrauliques.

Ce chapitre décrira les éléments de base du système électrohydraulique ainsi que leurs modélisation mathématique. Dans un premier temps, le détail de la modélisation par rapport au système sera défini en délimitant la région d'importance afin d'établir un modèle suffisant. Par la suite, les hypothèses précédant les descriptions mathématiques seront mentionnées et enfin les modèles mathématiques seront présentés.

La partie dynamique du système consiste en un vérin hydraulique contrôlé par une servovalve (Moog) qui contrôle le débit du fluide fourni aux verin responsable de la commande de la vanne de controle du système combustible de gaz (GCV). Le fluide est fourni du réservoir à la pompe à cylindrée variable, par alimentation à pression variable.

Les hypothèses suivantes ont été émises afin de simplifier la modélisation du système :

1. Les unités hydrauliques sont montées complètement rigides.
2. La pression d'alimentation variable est de 110bar.
3. Un écoulement de fuite est présent dans les cylindres ou les vannes.

4.2 Servovalve

Une servovalve est un dispositif de commande proportionnelle utilisé pour effectuer le débit et / ou la pression hydraulique à sa sortie, et est modulée par un signal de commande électrique à son entrée à travers un régulateur proportionnel-intégral-dérivé (régulateur PID) afin de mesurer la puissance délivrée au récepteur hydraulique. C'est également un amplificateur de puissance à très forte amplification.

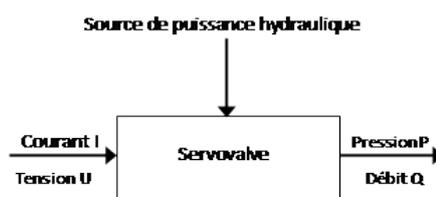


FIGURE 4.1 – Modèle fonctionnel :Servovalve

4.2.1 Classification de la servovalve

Les servovalves à plusieurs étages hydrauliques qui sont réparties en deux catégories selon la nature des paramètres hydrauliques contrôlés à leur sortie : les servovalves "débit" et les servovalves "pression". De plus, la servovalve est composée d'un étage électrique et d'un ou plusieurs étages hydrauliques, ce qui assure un débit et / ou une pression progressifs proportionnellement à la commande électrique. Par conséquent, la classification des servovalves peut être étendue en fonction de la nature et du nombre d'étages hydrauliques. La figure suivante montre la structure générale de la servovalve [HERBERT, 1967] :

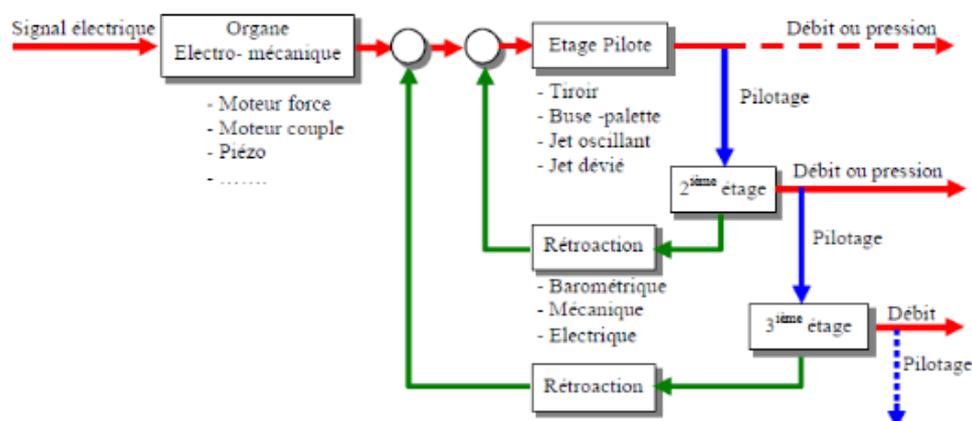


FIGURE 4.2 – Architecture générale d'une servovalve

1. Servovalve à deux étages

La servovalve dans le circuit étudié est constituée de deux étages. Les servovalves à deux étages comprennent généralement des composants électriques (moteurs) avec un système de rétroaction (contrôle de position), un étage hydraulique pilote (étage d'amplification) et un étage de puissance hydraulique (étage de distribution).

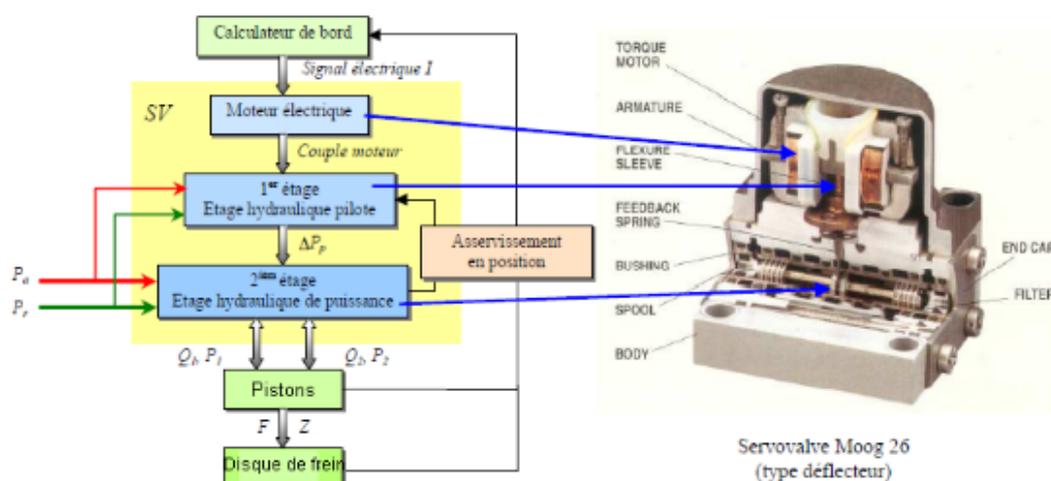


FIGURE 4.3 – Architecture d'une servovalve à deux étages

4.2.2 Les différentes parties de la servovalve

1. Moteur électrique

C'est l'interface entre l'électronique de commande et la commande de niveau hydraulique. Il s'agit généralement d'un moteur électromagnétique "sec", c'est-à-dire qu'il n'a aucun contact avec le fluide. Cette solution élimine la magnétisation des particules dans le fluide, éliminant ainsi le risque de contamination du moteur.

2. Etage hydraulique pilote

Cette étape d'amplification d'effort est utilisée pour contrôler le diviseur de puissance. Selon son principe de fonctionnement, il est divisé en plusieurs types, parmi lesquels :

- Buse / plateau : Ce type de système est facile à concevoir, mais il est sensible à la pollution, ce qui peut provoquer de graves pannes (embarquement de l'actionneur).

- Jet oscillant (buse d'injecteur) : Ce type d'étage est difficile à concevoir et plus résistant à la contamination, il présente donc moins de pannes critiques (les performances du système d'asservissement de la position de l'actionneur sont réduites).

- Défecteur (jet dévié) : Cette technologie permet à son concepteur de contourner le brevet du jet oscillant. L'effet de pollution est similaire à la technologie du jet oscillant.

3. Etage hydraulique de puissance

Il est responsable de la distribution du débit à la charge (cylindre). Parmi les différentes technologies, les tiroirs cylindriques avec des butées pointues sont devenus

essentiels pour la plupart des applications.

4. Dispositif de rétroaction

Il s'agit d'un système qui contrôle la position du tiroir pour contrôler la servovalve. Le ressort de rétroaction mécanique génère un couple sur le couple moteur, évitant ainsi l'effet de commande.

4.2.3 Les différents types de la servovalve

Nous introduirons trois types différents de servovalve (basées sur les principes de la première étape).

1. Servovalve buse à jet

Le premier étage est composé d'une palette et deux buses. La palette est rigidement fixée à l'armature et supportée par un tube flexible. Le moteur électromagnétique compose deux aimants permanents et une armature sur laquelle sont fixées symétriquement deux bobines.

L'armature et la palette sont montées en liaison pivot réalisée par le tube flexible. Lorsqu'il n'y pas de courant de commande, la palette est centrée et la pression différentielle de pilotage est nulle. Lorsque la servovalve reçoit la commande, le courant provoque un couple électromagnétique sur l'armature qui entraîne le déplacement de la palette entre les buses [GALAL, 2009].

En pratique, pour assurer la linéarité de la servovalve, la pression différentielle délivrée par l'étage amplificateur est proportionnelle au courant de commande

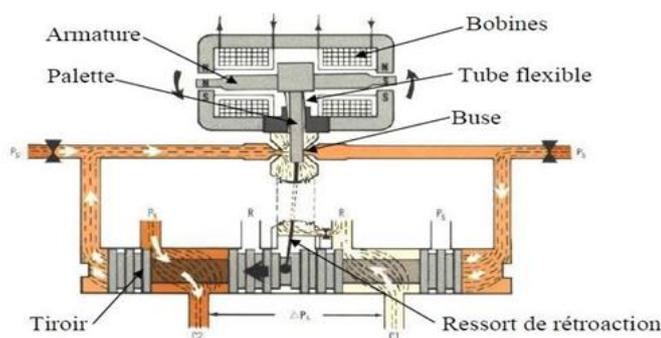


FIGURE 4.4 – Servovalve de type buse-palette

2. Servovalve de type jet pipe

Le principe de base est le même que celui de la servovalve à buse à plateau, mais ce type est différent du précédent au stade pilote. L'éjecteur génère un jet de fluide dirigé vers le trou de réception, lequel jet de fluide convertit la pression dynamique du jet en une pression pilote statique [GALAL, 2009]. Ce type de servovalve c'est le type adopté dans notre circuit électro-hydraulique.

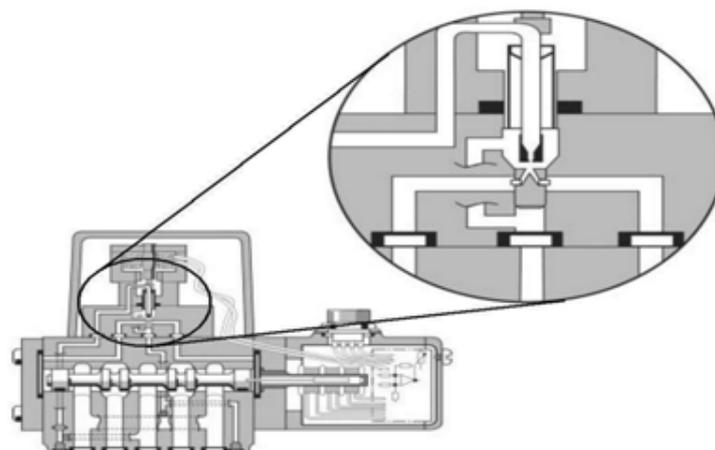


FIGURE 4.5 – Servovalve type jet pipe

3. Servovalve à défecteur

L'injecteur est fixé et le jet est orienté par un déviateur mobile.

La servovalve est caractérisée par le nombre d'orifices, le nombre de positions, la nature de la commande, le débit et la pression maximale admissible[GALAL, 2009].

Symbolisation La symbolisation se réalise en 2 étapes : Construction du symbole de base (nombres d'orifices, nombres de positions). Représentation du type de commande.

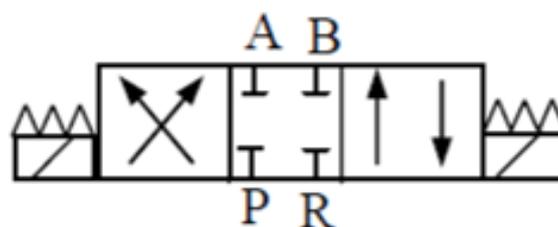


FIGURE 4.6 – Servovalve 4/3 (4 orifices et 3 positions)

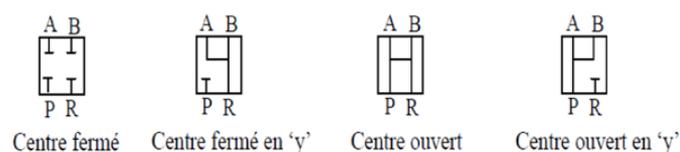


FIGURE 4.7 – Les positions de centre d'une servovalve 4/3

4.3 Les récepteurs hydrauliques

Un système hydraulique concerne généralement les activités liées au déplacement, à la préhension ou appliquer une force à un objet. Les appareils qui atteignent ces objectifs sont appelés actionneurs. Les actionneurs sont des composants d'interface qui convertissent la puissance hydraulique en puissance mécanique. Selon qu'un actionneur donne un mouvement de rotation ou un mouvement linéaire, les actionneurs sont essentiellement classés comme [HERBERT, 1967] :

- Actionneurs rotatifs.
- Actionneurs linéaires.

Les actionneurs linéaires, comme leur nom l'indique, sont utilisés pour déplacer des objets ou appliquer une force dans une ligne droite. Ceux-ci sont autrement appelés vérins hydrauliques.

4.3.1 Les vérins hydrauliques

Les vérins sont des moteurs linéaires qui transforment une puissance hydraulique en puissance mécanique au travers du déplacement linéaire d'une tige. On obtient donc directement un mouvement de translation.

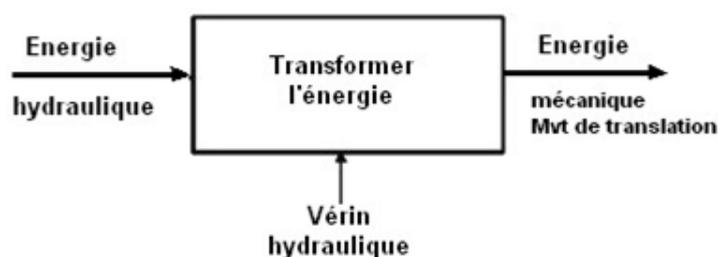


FIGURE 4.8 – Modèle fonctionnel : Vérin Hydraulique.

Les vérins hydrauliques sont en outre classés comme :

- Vérins à double effet.
- Vérins simple effet et c'est le type utilisé dans notre circuit .

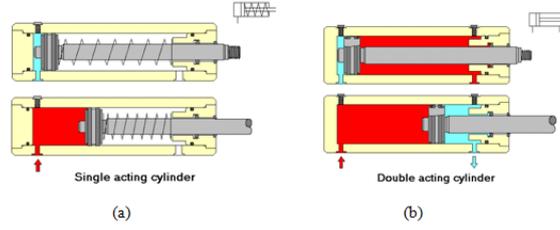


FIGURE 4.9 – a) Vérin à simple effet (b) Vérin à double effet

4.4 Modélisation mathématique du système

4.4.1 Modélisation des vérins

La modélisation du cylindre fait référence à la détermination de la pression dans la chambre du cylindre ainsi qu'à la description du mouvement du piston. Les pressions sont exprimées via les équations de continuité d'écoulement tandis que le mouvement du système est donné par la loi de mouvement II de Newton.

Équations de continuité pour le vérin

L'écoulement incompressible dans le vérin est exprimé par les équations de continuité données par

$$Q_P - Q_l = \frac{dv_p}{dt} + \frac{v_p}{\beta} \cdot \frac{dp_p}{dt} \quad (4.1)$$

$$Q_l - Q_r = \frac{dv_r}{dt} + \frac{v_r}{\beta} \cdot \frac{dp_r}{dt} \quad (4.2)$$

$$V_p = V_{po} + A_p y \quad (4.3)$$

$$V_r = V_{ro} + A_r y \quad (4.4)$$

Donc

$$Q_P = \frac{dv_p}{dt} + \frac{v_p}{\beta} \cdot \frac{dp_p}{dt} \quad (4.5)$$

$$-Q_r = \frac{dv_r}{dt} + \frac{v_r}{\beta} \cdot \frac{dp_r}{dt} \quad (4.6)$$

Q_P : débit dans le cylindre d'essai côté piston ; Q_l : débit de fuite sur le piston du cylindre ; Q_r : écoulement en dehors du cylindre d'essai côté tige ; v_p : volume côté piston ; v_r : volume côté tige ; V_{po} : volume initial côté piston ; V_{ro} : volume initial côté tige ; A_p : surface du piston ; A_r : surface du piston côté tige ; P_p : pression agissant dans la chambre côté piston ; P_r : pression agissant dans la chambre côté tige ; β : module de masse du fluide (bulk modulus) ; y : déplacement du piston de la position initiale ; \dot{y} : vitesse du piston.

En négligeant le débit de fuite, Q_l , le gradient de pression du côté tige et piston peut être exprimé à partir de l'équation (4.5) et (4.6)

$$Q_p = A_p \dot{y} + \frac{V_0}{\beta} \frac{dP_p}{dt} + \frac{A_p}{\beta} \frac{dP_p}{dt} \quad (4.7)$$

$$-Q_r = -A_r \dot{y} + \frac{V_0}{\beta} \frac{dP_r}{dt} + \frac{A_r}{\beta} \frac{dP_r}{dt} \quad (4.8)$$

Équation du mouvement

L'équation du mouvement du système est donnée par la loi de mouvement de Newton II à partir de la force agissant sur les pistons interconnectés :

$$m_{eq} \ddot{y} = P_p A_p - P_r A_r \quad (4.9)$$

\ddot{y} = Accélération des masses m_{eq} = Masse totale des corps en mouvement

4.4.2 Modélisation de la servovalve

Une servovalve est un dispositif complexe qui présente une réponse non linéaire d'ordre élevé, et la connaissance d'un grand nombre de paramètres de vanne internes est nécessaire pour formuler un modèle mathématique précis. En effet, de nombreux paramètres tels que la taille des buses et des orifices, les taux de ressort, la géométrie de la bobine, etc., sont ajustés par le fabricant pour régler la réponse de la valve et ne sont normalement pas disponibles pour l'utilisateur.

le sous-système utilise une servovalve MOOG G771K (Servovalve à 2 étages). Le débit à travers l'orifice de la servovalve est déterminé à partir de l'entrée de la vanne, ce qui équivaut à un déplacement du tiroir de la vanne et à la chute de pression sur la vanne.

Pour ce sous-systèmes, la modélisation de la servovalve consiste à modéliser les différents éléments importants qui la compose y compris la vanne à clapet (Flapper valve) et la vanne principale qui est de type tiroir cylindrique (Spool valve).

Vanne à clapet (Flapper valve)

La vanne à clapet agit comme un amplificateur hydraulique dans les servovalves (EHSV). Elle est excitée par un très petit déplacement du clapet (généralement à 30 μm). Elle produit une différence de haute pression proportionnelle au déplacement du clapet.

- **Débits à travers les restrictions du clapet**

Les débits à travers les restrictions du clapet sont donnés par le équations suivantes :

$$Q_1 = C_D A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} \quad (4.10)$$

$$Q_2 = C_D A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_2)} \quad (4.11)$$

$$Q_3 = C_d \pi d_f (x_i + x_f) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_3)} \quad (4.12)$$

$$Q_4 = C_d \pi d_f (x_i - x_f) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 - P_4)} \quad (4.13)$$

$$Q_2 = C_d A_s \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_5)} \quad (4.14)$$

Avec,

A_0 : Surface de l'orifice, m^2 ; A_s : Surface de l'orifice de vidange, m^2 ; C_d et C_D : Coefficients de décharge; d_f : Diamètre de la buse du clapet, m ; P_1 : Pression sur le côté gauche de la valve à clapet, Pa; P_2 : Pression sur le côté droit de la valve à clapet, Pa; P_3 : Pression dans la chambre de retour du clapet, Pa; P_T : pression de la conduite de retour, Pa; Q_1 : Débit dans l'orifice gauche, m^3 ; Q_2 : Débit dans l'orifice droit, m^3 ; Q_3 : Débit de la buse de clapet gauche, m^3 ; Q_4 : Débit de la buse de clapet droit, m^3 ; Q_5 : Débit de vidange du clapet, m^3 ; x_f : Déplacement du clapet au niveau des buses à jet, m ; x_i : Ouverture initiale de la buse du clapet; clapet limiteur déplacement, m ; ρ = densité d'huile, kg/m^3 .

• Équations de continuité appliquées aux chambres à clapet

L'application de l'équation de continuité aux chambres à clapet entraîne les relations suivantes :

$$Q_1 - Q_3 + A_s \frac{dx}{dt} = \frac{V_0 - A_s x}{B} \frac{dP_1}{dt} \quad (4.15)$$

$$Q_2 - Q_4 + A_s \frac{dx}{dt} = \frac{V_0 - A_s x}{B} \frac{dP_2}{dt} \quad (4.16)$$

$$Q_3 - Q_4 + Q_5 = \frac{V_3}{B} \frac{dP_3}{dt} \quad (4.17)$$

Avec, A_s = Section transversale du tiroir cylindrique, m^2 B = module d'élasticité iso-statique, Pa V_0 = Volume initial d'huile dans la chambre côté tiroir, m^3 V_3 = Volume de la chambre de retour du clapet, m^3

• Équation de mouvement du tiroir cylindrique (Spool)

Le mouvement du tiroir cylindrique est décrit par les équations suivantes :

$$A_s (P_2 - P_1) = m_s \frac{d^2 x}{dt^2} + f_s \frac{dx}{dt} + F_j + F_s \quad (4.18)$$

Avec,

F_j = Force d'impulsion hydraulique, N

F_s = Coefficient de frottement du tiroir cylindrique, Ns/m

f_s = Force agissant à l'extrémité du ressort de réaction, N

m_s = Masse de bobine, kg

- **Débits à travers la vanne à tiroir cylindrique (Spool Valve)**

reliant la valve au cylindre symétrique, les débits à travers les zones de restriction de valve sont donnés par :

$$Q_a = C_d A_a(x) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_A - P_T)} \quad (4.19)$$

$$Q_b = C_d A_b(x) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_A)} \quad (4.20)$$

$$Q_a = C_d A_c(x) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_B)} \quad (4.21)$$

$$Q_a = C_d A_d(x) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_B - P_T)} \quad (4.22)$$

$$\left. \begin{array}{l} A_a = A_c = \omega c \\ A_b = A_d = \omega \sqrt{x^2 + c^2} \end{array} \right\} \text{Pour } x \geq 0$$

$$\left. \begin{array}{l} A_a = A_c = \omega \sqrt{x^2 + c^2} \\ A_b = A_d = \omega c \end{array} \right\} \text{Pour } x \leq 0$$

Avec,

c = Dégagement radial du tiroir cylindrique, m ; ω = Largeur des orifices sur le manchon de vanne, m ; P_A et P_B = pressions des vérins hydrauliques, Pa.

Simulation

Chapitre 5 : Simulation

5.1 Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre, les résultats des simulations que nous avons réalisées via deux logiciels Simulink et SimulationX. Le but de la simulation est de décrire la dynamique du système et comment cette dynamique est affectée quand les différents paramètres du fluide fournis sont changés.

5.2 Simulation via Simulink(Matlab)

5.2.1 Présentation du produit MATLAB

MATLAB est un langage informatique technique de haut niveau et un environnement interactif pour le développement d'algorithmes, la visualisation de données, l'analyse de données et le calcul numérique.

En utilisant le produit MATLAB, on peut résoudre les problèmes informatiques techniques plus rapidement qu'avec les langages de programmation traditionnels, tels que C, C++ et Fortran. Le MATLAB peut être utilisé dans un large éventail d'applications, y compris le traitement du signal et de l'image, les communications, la conception de contrôle, les tests et les mesures, la modélisation et l'analyse financières et la biologie computationnelle. Des boîtes à outils complémentaires (collections de fonctions MATLAB à usage spécial, disponibles séparément) étendent l'environnement MATLAB pour résoudre des classes particulières de problèmes dans ces domaines d'application [MATLAB, 2020].

5.2.2 Simulink

Simulink est une extension graphique de MATLAB pour la modélisation et la simulation de systèmes. Dans Simulink, les systèmes sont dessinés à l'écran sous forme de diagrammes. De nombreux éléments de schémas fonctionnels sont disponibles (tels que les fonctions de transfert, les jonctions de sommation, etc.), ainsi que les périphériques d'entrée virtuels (tels que les générateurs de fonctions) et les périphériques de sortie (tels que les oscilloscopes). Simulink est intégré à MATLAB et les données peuvent être facilement transférées entre les programmes [MATLAB, 2020].

Simscape

Le logiciel Simscape étend la gamme de produits Simulink avec des outils de modélisation et de simulation de systèmes physiques multidomaines, tels que ceux avec des composants mécaniques, hydrauliques, pneumatiques, thermiques, électriques et électromagnétiques. Contrairement aux autres blocs Simulink, qui représentent des opérations mathématiques ou opèrent sur des signaux, les blocs Simscape représentent directement des composants physiques ou des relations [MATLAB, 2020].

Le logiciel Simscape fonctionne dans l'environnement Simulink et s'interface de manière transparente avec le reste de la famille de produits Simulink et avec l'environnement informatique technique MATLAB®.

Simhydraulics

L'environnement de modélisation Simscape fournit l'approche de réseau physique pour la modélisation et la résolution de systèmes en cours de conception en tant que réseaux unidimensionnels. Le logiciel SimHydraulics utilise ces principes de modélisation de base et contient une bibliothèque de blocs hydrauliques spécialisés qui interagissent de manière transparente avec les blocs Simscape de base.

Les modèles SimHydraulics sont essentiellement des schémas fonctionnels Simscape. Lors de la construction d'un modèle SimHydraulics, on utilise une combinaison de blocs SimHydraulics avec les blocs des bibliothèques Simscape Foundation et Utilities. Chaque diagramme SimHydraulics doit avoir au moins un bloc de configuration de solveur de la bibliothèque Simscape Utilities. On peut utiliser les éléments mécaniques hydrauliques, électriques et unidimensionnels de translation et de rotation de base de la bibliothèque Simscape Foundation et les connecter directement aux blocs SimHydraulics [MATLAB, 2020].

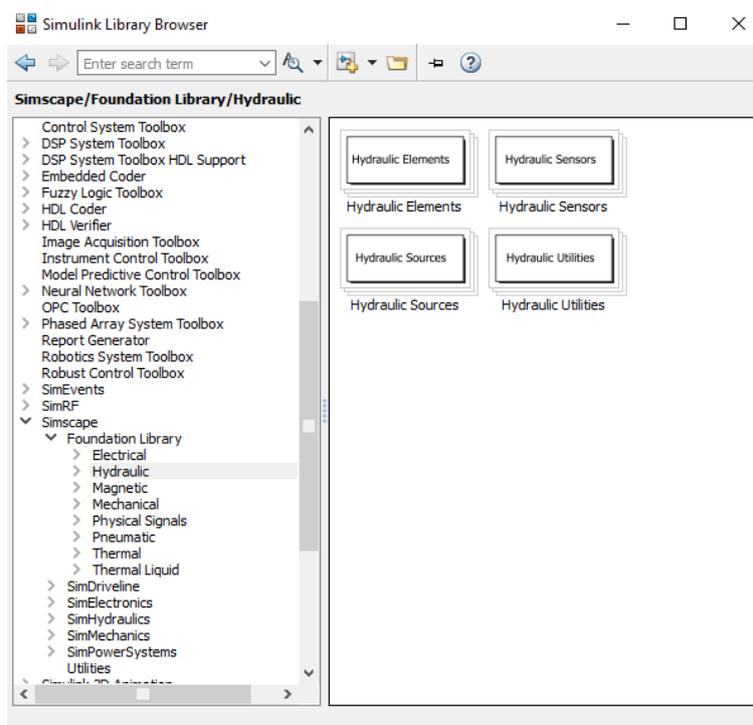


FIGURE 5.1 – Fenêtre de la bibliothèque Simhydraulics

- **Fonctionnement des modèles Simhydraulics**

;

Le logiciel SimHydraulics offre plusieurs façons de simuler et d'analyser la puissance hydraulique et les systèmes de contrôle dans l'environnement Simulink. L'exécution d'une simulation hydraulique est similaire à l'exécution d'une simulation de tout autre modèle Simscape.

- **Simulation du système électrohydraulique**

Le logiciel SimHydraulics utilise ces principes de modélisation de base et contient une bibliothèque de blocs hydrauliques spécialisés qui interagissent de manière transparente avec les blocs Simscape de base. Lors de la modélisation des systèmes de puissance et de commande hydrauliques, on utilise les bibliothèques Simscape suivantes

- Bibliothèque de base - Contient des blocs de signaux hydrauliques, mécaniques et physiques de base.
- Bibliothèque SimHydraulics - Contient des blocs de diagramme hydraulique avancés, tels que des vannes, des cylindres, des pipelines, des pompes et des accumulateurs.
- Bibliothèque d'utilitaires - contient des blocs d'environnement essentiels pour créer des modèles de réseaux physiques

Nous pouvons combiner tous ces blocs dans nos diagrammes SimHydraulics pour modéliser des systèmes hydrauliques.

5.2.3 Construction du modèle hydraulique

Nous allons utiliser le circuit mentionné dans le chapitre 2 pour modéliser notre système de commande hydraulique.

1. Modélisation d'unité de puissance en Simhydraulics

La figure ci-dessus présente le modèle d'unité de puissance via simhydraulics

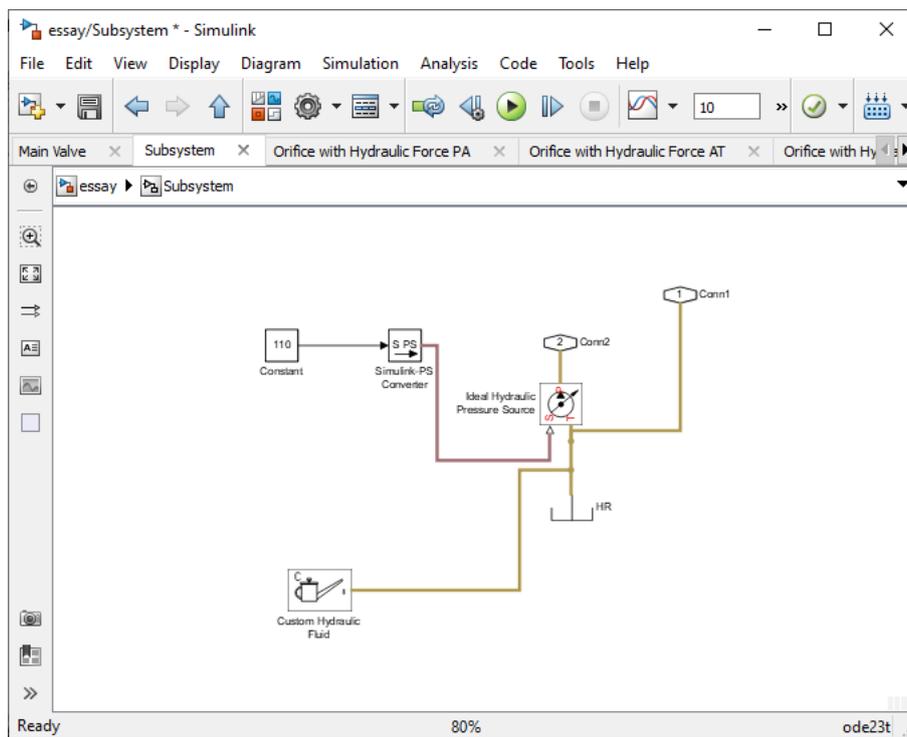


FIGURE 5.2 – Modélisation d’unité de puissance en Simhydraulics

2. Conception de vanne proportionnelle et directionnelle 3/2 personnalisée (Moog)

Le but de la personnalisation de cette vanne est une tâche très importante dans ce système. Il n’y a plus de bloc similaire à la vanne directionnelle 2/3 dans la bibliothèque de valves Simscape. Nous avons donc analysé et personnalisé la vanne pour le système.

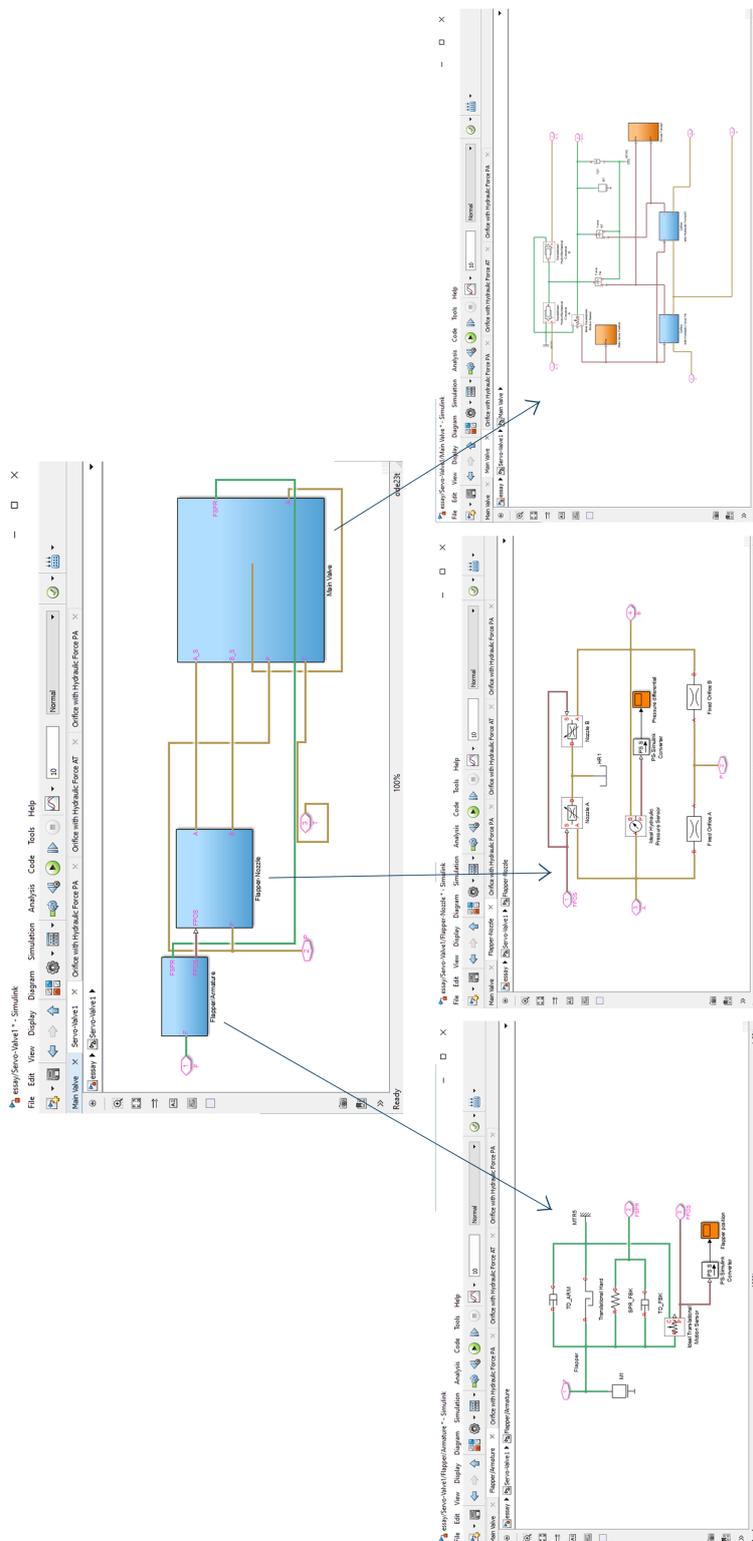


FIGURE 5.3 – Modélisation de la servovalve

3. Modélisation de bloc du vérin à simple effet

Ce bloc représente un vérin hydraulique à simple effet, c'est-à-dire un dispositif qui transfère la force et le mouvement dans une seule direction. Le modèle du vérin est construit à partir du convertisseur hydromécanique translationnel et des blocs d'arrêt translationnel (figure 5.4).

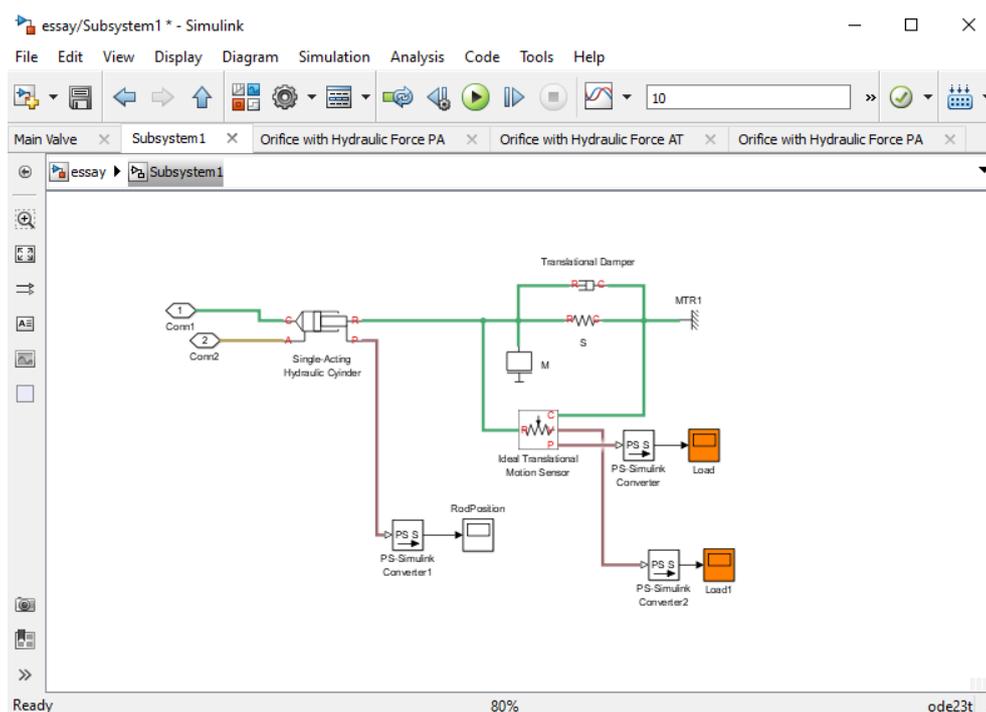


FIGURE 5.4 – Modélisation d'un vérin a simple effet en Simhydraulics

5.2.4 Simulation du système électrohydraulique

Après avoir conçu tous les blocs mentionnés précédemment, nous avons pu construire notre circuit hydraulique et nous avons ensuite fait rentrer tous les paramètres nécessaires, par un double clic sur chaque composant, un block de paramètres s'ouvre ce qui nous permet de contrôler et changer toutes les valeurs. la pression régnante dans le système doit être entrée, donc on l'a fixé à 110 bar.

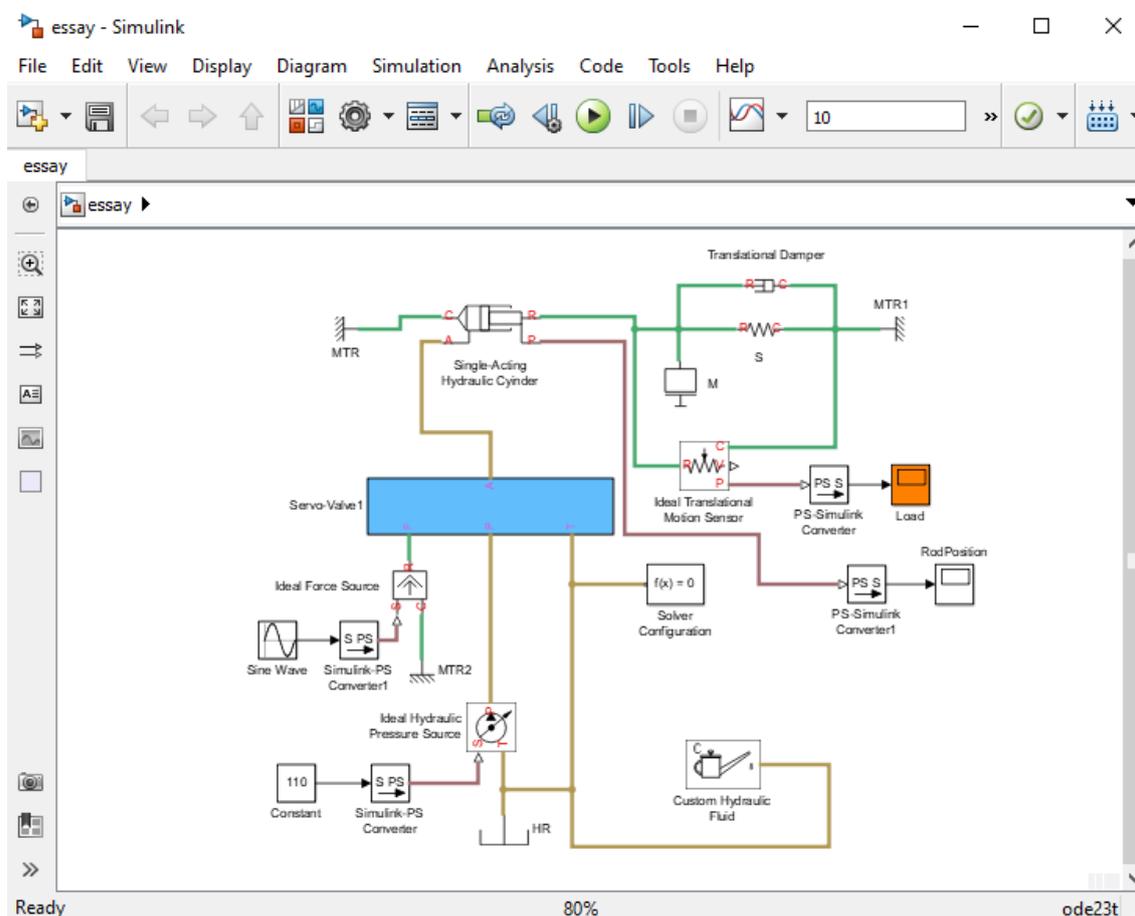


FIGURE 5.5 – système électrohydraulique

Pour changer les paramètres du fluide circulant dans le système, on clique deux fois sur l'élément 'Hydraulic Oil Custume' qui se trouve dans l'unité de puissance, un block qui contient tous les paramètres d'huile nécessaires tels que la densité, la viscosité et le module d'élasticité s'ouvre. Afin d'établir une comparaison entre les caractéristiques de l'huile neuve et celle en service, nous lançons la simulation deux fois. Une première fois avec les propriétés de l'huile en service et une deuxième avec les propriétés de l'huile neuve en suivant dans les deux cas le même processus.

On clique deux fois sur l'élément 'Hydraulic Oil Custume' trouvé dans l'unité de puissance, un block qui contient tous les paramètres d'huile tels que la densité, la viscosité et le module d'élasticité s'ouvre.

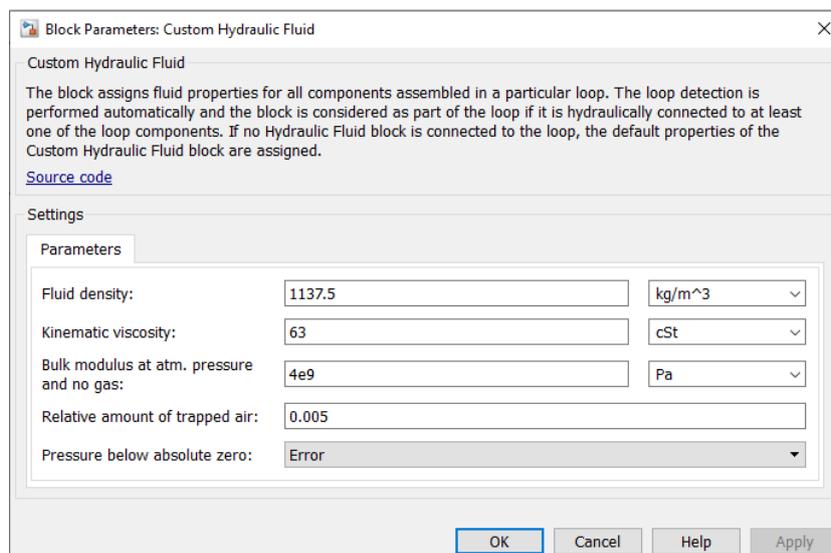


FIGURE 5.6 – Block de paramètres de fluide

Avant de lancer la simulation, on doit d'abord choisir le type de solveur et l'équation différentielle ordinaire qu'il va résoudre. Pour notre cas, un type de solveur Variable-Step et un type d'équation ode23t (Solve moderately stiff ODEs and DAEs — trapezoidal rule) ont été choisis Figure 5.22.

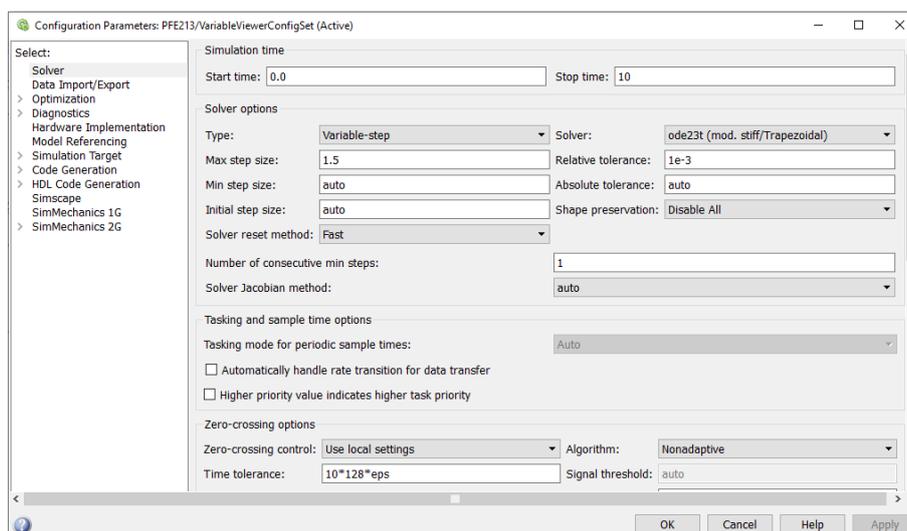


FIGURE 5.7 – Configuration du solveur

Une fois tous les paramètres nécessaires sont introduits, la simulation est lancée.

5.2.5 Interprétation des résultats

A la fin de la simulation, nous avons exporté les résultats sous formes de graphes présentant la position du piston du vérin, la vitesse du clapet armature, la pression dans le clapet buse et enfin le taux d'ouverture de la vanne principale. Ces graphes sont présentés ci-dessous.

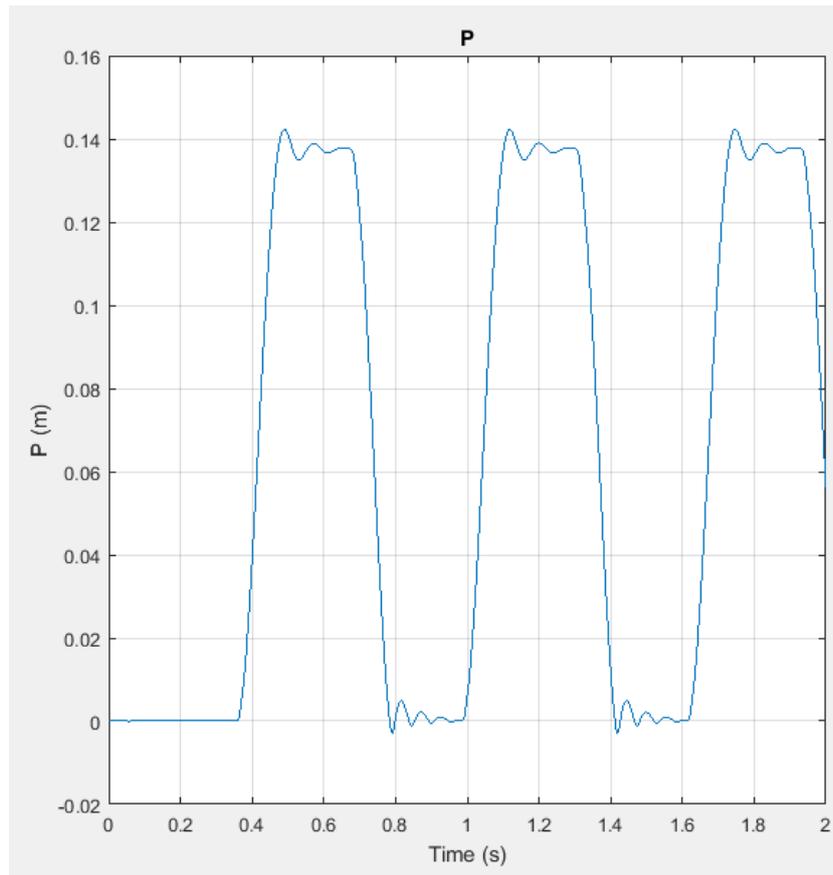


FIGURE 5.8 – La position du piston du vérin (cas de l'huile neuve)

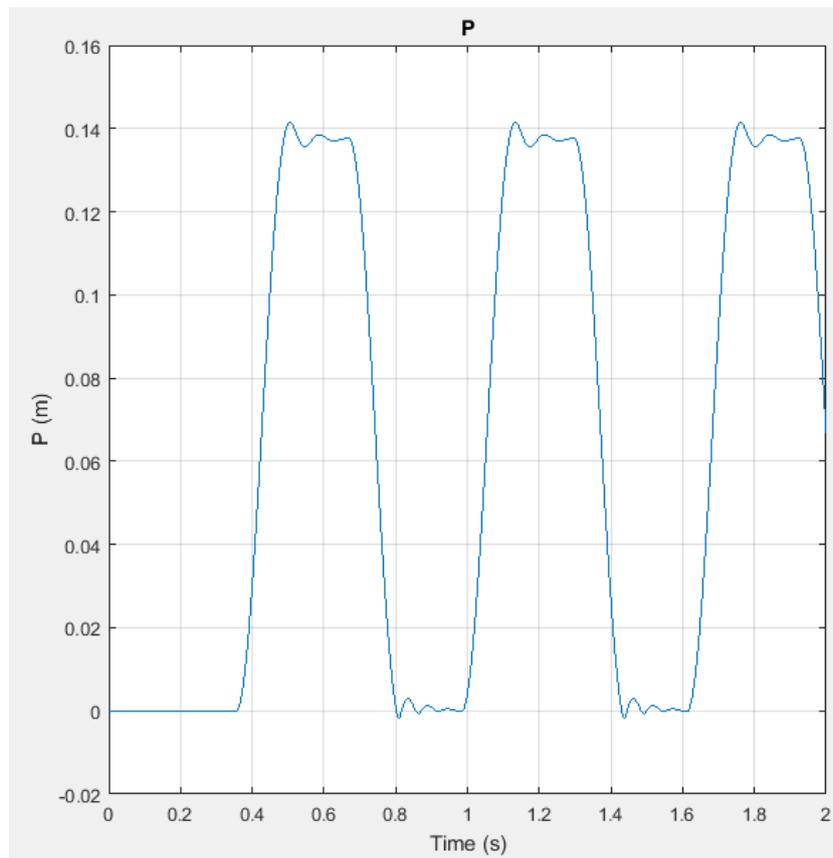


FIGURE 5.9 – La position du piston du vérin (cas de l'huile en service)

Les résultats montrent que dans le cas de l'huile neuve le piston se déplace de 14cm avec une périodicité de 0,65, celle ci s'applique également au cas de l'huile en service mais avec un taux de déplacement moins élevé.

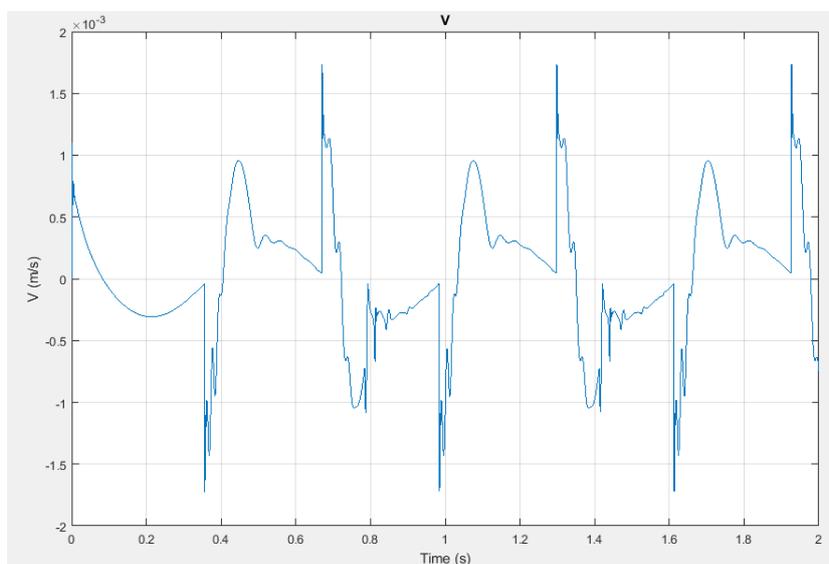


FIGURE 5.10 – La vitesse de l’assemblage clapet-armature (cas de l’huile neuve)

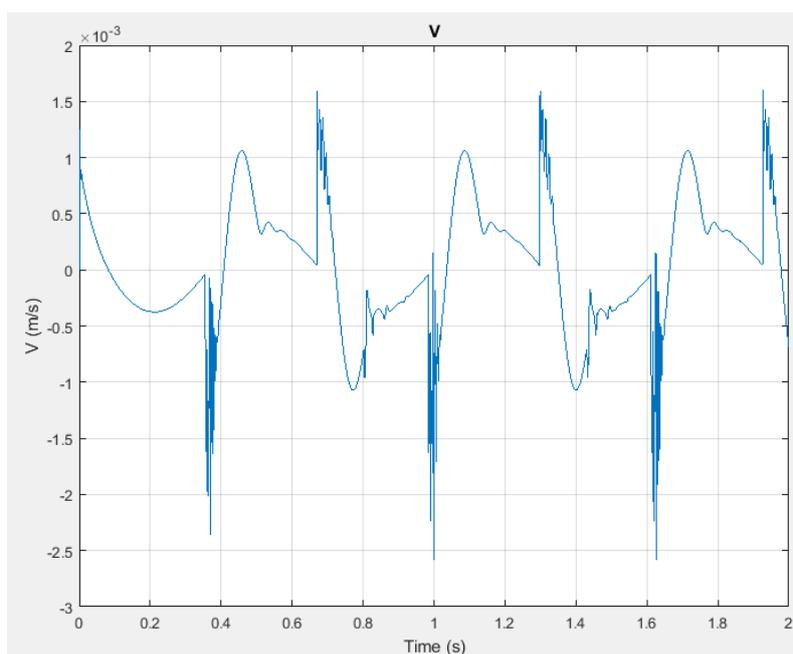


FIGURE 5.11 – La vitesse de l’assemblage clapet-armature (cas de l’huile en service)

Les résultats montrent que les vitesses maximales atteintes par le clapet dans le cas de l’huile neuve sont plus élevées que dans le cas l’huile en service, alors que les vitesses minimales négatives dans le cas de l’huile en service sont plus élevées en valeur absolue que celles de l’huile neuve. Les fluctuations au voisinage des min et des max sont plus fréquentes dans le cas de l’huile en service.

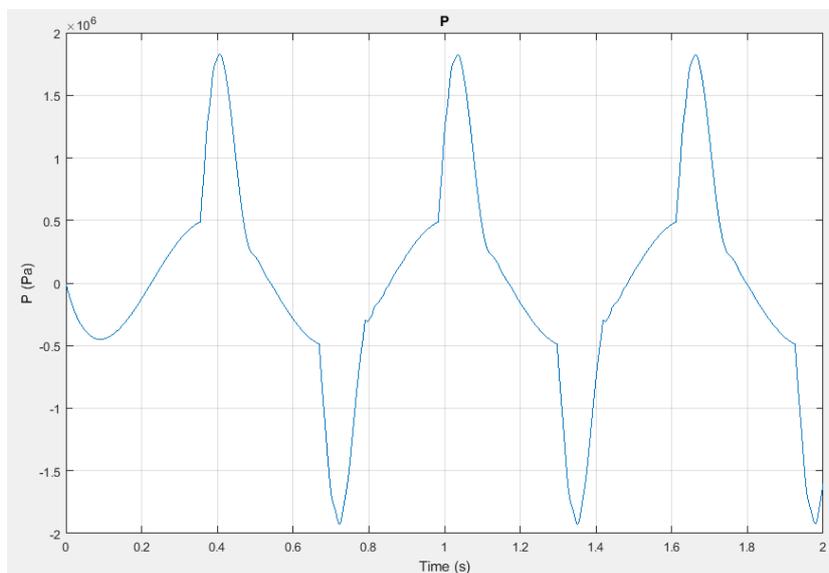


FIGURE 5.12 – La pression dans le clapet-buse (cas de l'huile neuve)

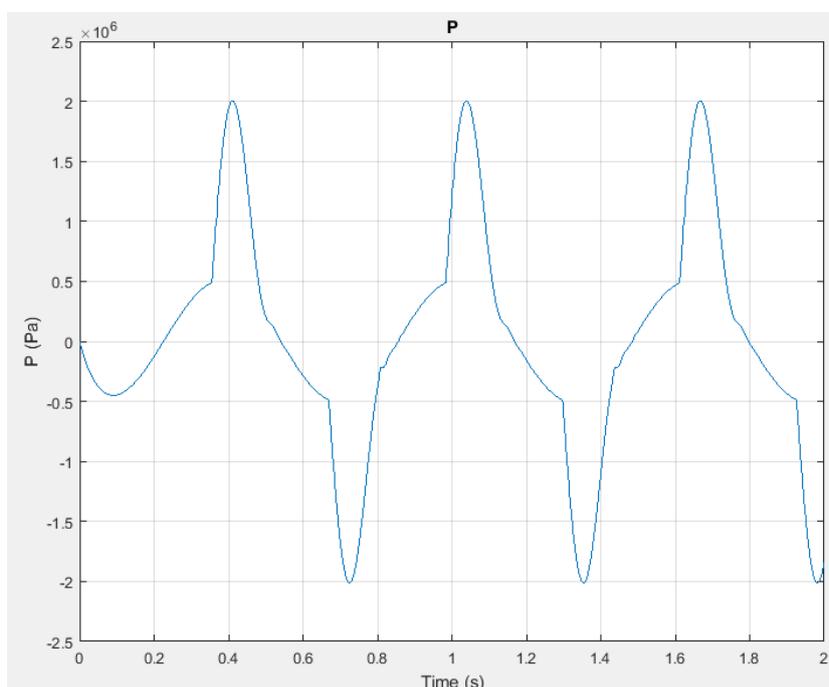


FIGURE 5.13 – La pression dans le clapet-buse (cas de l'huile en service)

Les résultats montrent que dans le cas de l'huile neuve, l'assemblage clapet-armature atteint une pression de 18bar et dans le cas de l'huile usée cette dernière augmente jusqu'à atteindre 20bar.

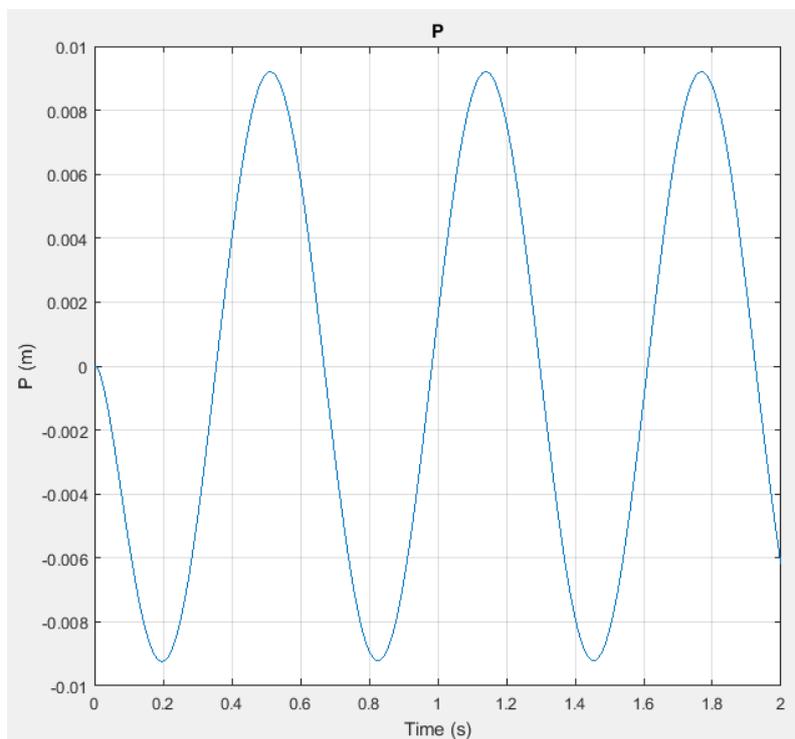


FIGURE 5.14 – Le taux d’ouverture de la vanne principale (cas de l’huile neuve)

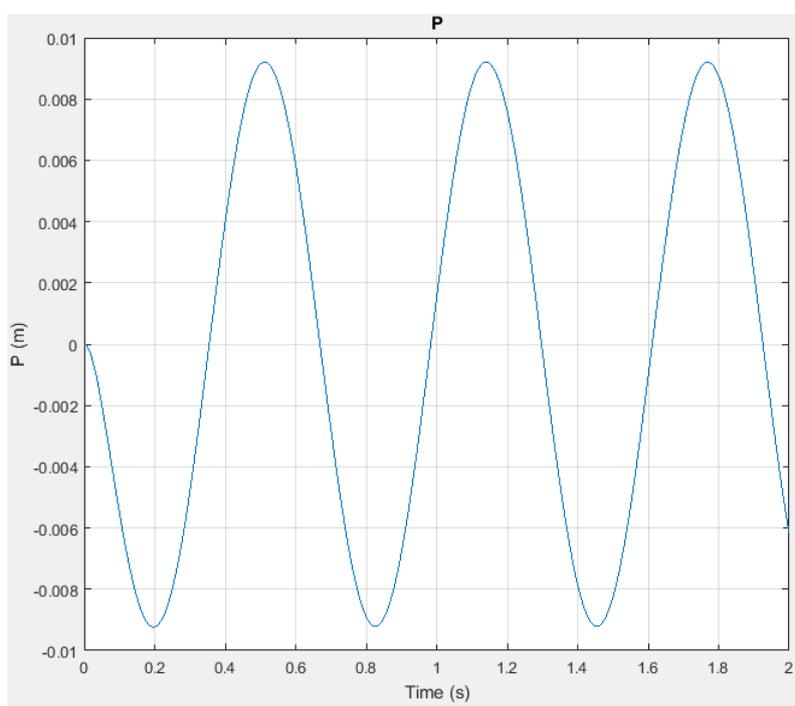


FIGURE 5.15 – La taux d’ouverture de la vanne principale (cas de l’huile en service)

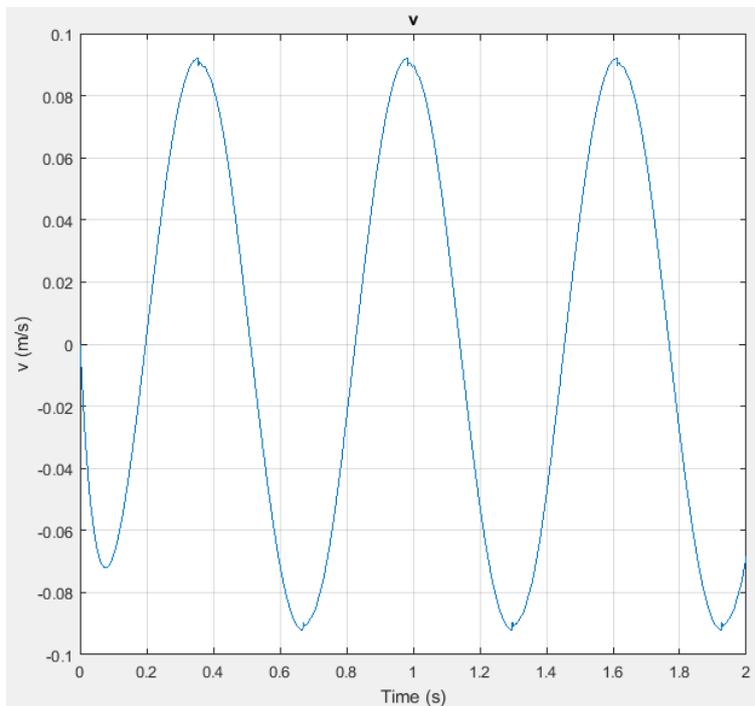


FIGURE 5.16 – La vitesse d’ouverture de la vanne principale (cas de l’huile neuve)

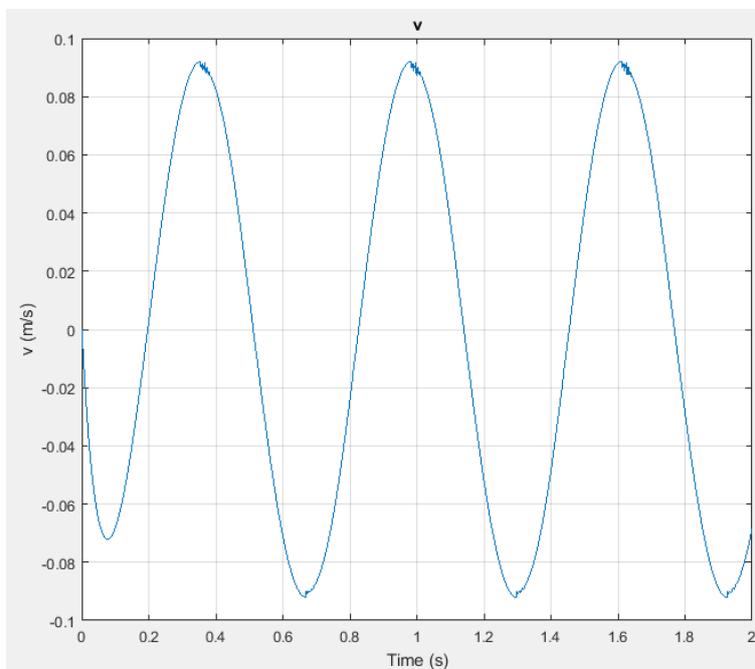


FIGURE 5.17 – La vitesse d’ouverture de la vanne principale (cas de l’huile en service)

Les résultats montrent que dans le cas de l'huile neuve la vitesse d'ouverture maximale atteint 0.95m/s avec quelques petites fluctuations à son voisinage.

Dans le cas de l'huile en service, la valeur maximale reste la même avec des fluctuations plus fréquentes à son voisinage. En ce qui concerne le taux d'ouverture, aucune différence n'est à signaler.

On est arrivé à approuver le modèle réalisé par simulink en trouvant la même allure d'évaluation de la longueur du piston du cylindre que celle trouvé par [MICHEL, 2017].

5.3 Simulation via SimulationX

SimulationX est un outil de simulation, intégrant blocs de contrôle et éléments physiques issus des domaines de la mécanique (plan ou multi corps 3D), de l'hydraulique, du pneumatique, de la transmission de puissance, de l'électromécanique, de l'électrique, de l'électronique, du magnétique, de la thermique et de la thermodynamique. SimulationX est comme tous les modèles de simulations qui sont créés sur la base d'une approche réseau discrète. Cela signifie que le système est divisé en parties logiques liées par des connexions spécifiques.

Ces sous-systèmes sont représentés par des éléments de modèle préconfigurés ou personnalisés organisés en bibliothèques de modèles spécifiques au domaine et personnalisées. Les sous-modèles sont ensuite paramétrés et connectés les uns aux autres. Les modèles peuvent être créés via l'interface utilisateur graphique ou en utilisant les lignes de commande Modelica [SimulationX, 2020].

Les bibliothèques de ce logiciel peuvent être obtenues sous forme de packages modulaires auprès du fabricant du logiciel. Il existe différentes bibliothèques disponibles avec des modèles de base pour les domaines physiques correspondants ainsi que des bibliothèques avec des modèles avancés pour des applications et des industries spécifiques. Selon l'objectif, l'utilisateur peut choisir parmi les éléments de modèles 1D, 2D et 3D en fonction des exigences de modélisation, de simulation et de paramétrage. Des bibliothèques tierces et personnalisées basées sur Modelica peuvent également être intégrées dans SimulationX.

La bibliothèque hydraulique offre des éléments pour une modélisation efficace et intuitive de systèmes et composants hydrauliques. Les utilisateurs peuvent créer leurs modèles selon le schéma du circuit hydraulique en quelques minutes, sans aucun besoin d'établir des équations différentielles, des diagrammes de flux de signaux ou un transfert de fonctions [SimulationX, 2020].

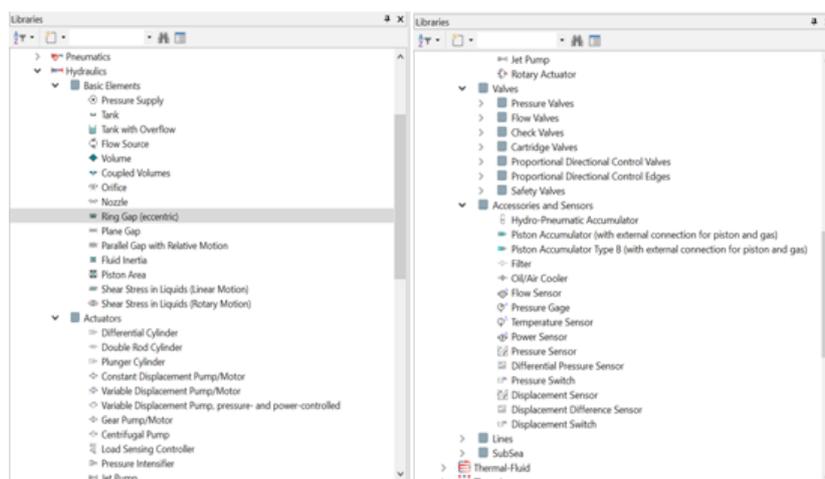


FIGURE 5.18 – Les composants de la bibliothèque hydraulique

5.3.1 Simulation du système électrohydraulique

La simulation sur SimulationX a pour principal objectif d'analyser l'impact d'huile sur les servovalves de notre système électro-hydraulique, et ce pour les deux types d'huile : Nouvelle et usée. Afin d'arriver à la visualisation finale de la simulation, les étapes suivantes ont été respectées.

En premier nous allons à l'environnement opérationnel, la partie centrale, et à partir de la partie gauche où se trouvent les bibliothèques, il y a différents blocs de bibliothèques et nous pouvons creuser à différents niveaux et ce sont les composants que nous utiliserons pour créer le modèle avec. Ce que nous faisons est de sélectionner le composant de la bibliothèque voulu et de le déposer dans notre zone de travail.

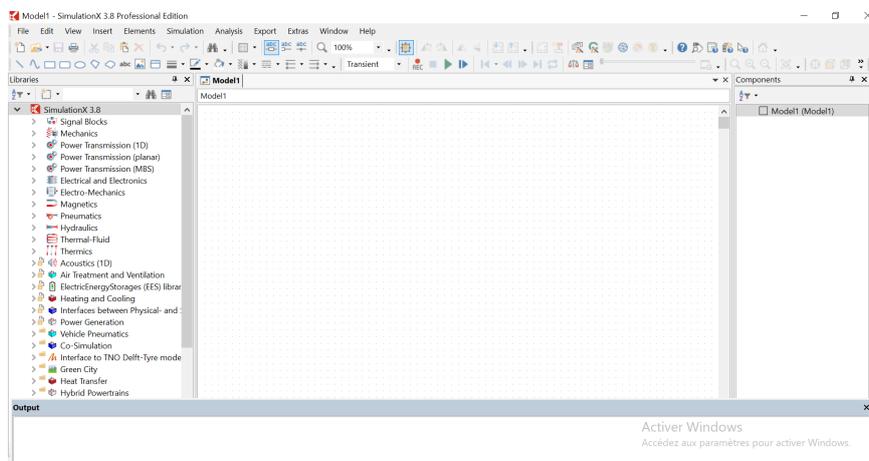


FIGURE 5.19 – L'interface du logiciel simulationX

Après avoir relié tous les composants du système entre eux avec des connexions (pipes) en respectant les types de liaisons on aura notre système hydraulique de la servovalve ,ensuite on fait rentrer tous les paramètres nécessaires, par un double clic sur chaque composant pour qu'on puisse contrôler notre système comme on a déjà fait avec Simulink.

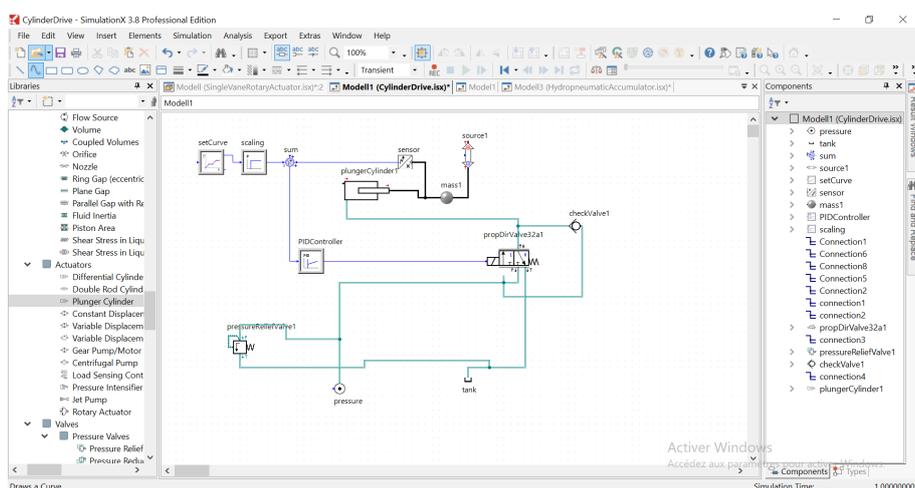


FIGURE 5.20 – La création du système électrohydraulique étudié

Ensuite après avoir conçu tout le système On fait rentrer les paramètres de l'huile circulant dedans, avec un double clic sur un des connexions (pipes), un block qui contient tous les paramètres d'huile nécessaires (tels que la densité, la viscosité, la température) s'ouvre.

On choisit la construction 'mon fluide' pour qu'on puisse créer un fluide selon les caractéristiques dont on a besoin contenant tous les paramètres obtenus lors de nos expériences.

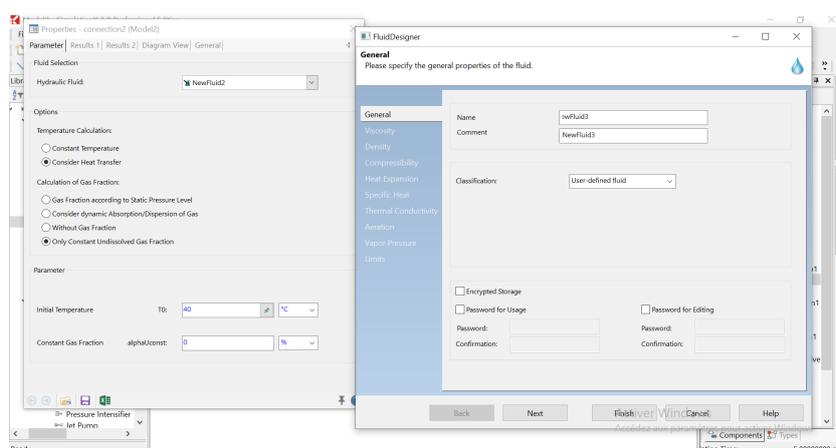


FIGURE 5.21 – Configuration des paramètres d'huile

- En fin et avant de lancer la simulation on fait rentrer les paramètres qu'on veut avoir

pour nos résultats (temps de la simulation, méthode ...)

5.3.2 Interprétation des résultats

A la fin de la simulation, nous avons exporté les résultats sous formes de graphes présentant la pression régnante à l'intérieur de la servovalve dans le cas de l'huile neuve et contaminée . Ces graphes sont présentés ci-dessous.

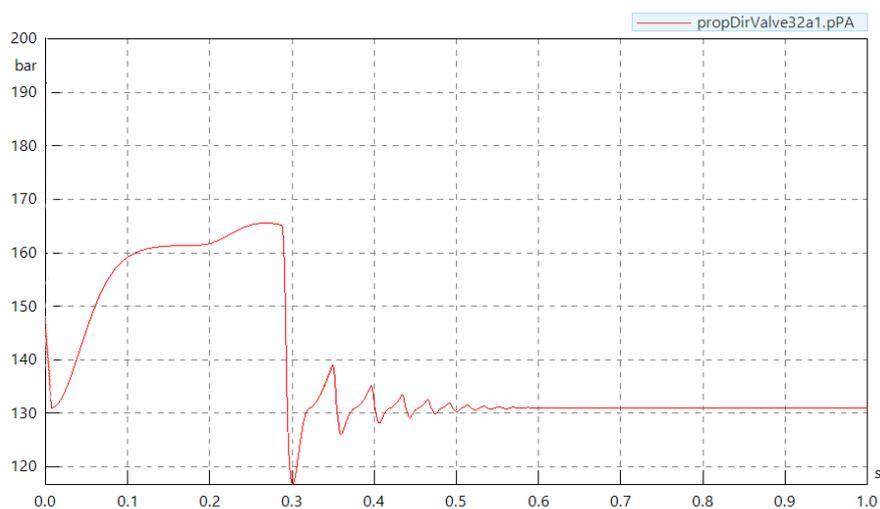


FIGURE 5.22 – Évolution de la pression à la sortie de la servovalve (cas de l'huile neuve)

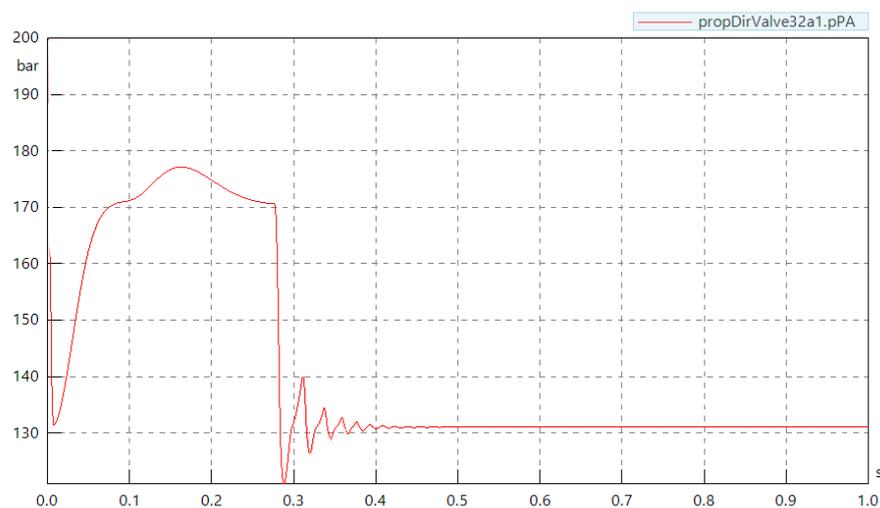


FIGURE 5.23 – Évolution de la pression à la sortie de la servovalve (cas de l'huile en service)

Les résultats montrent que la pression maximale atteinte au cours de l'intervalle de temps

0,3s est plus élevée dans le cas de l'huile en service que l'huile neuve. Après s'être annuler au bout d'environ 0,3s, la pression fluctue dans le cas de l'huile en service jusqu'à 0,4s puis se stabilise à une valeur de 131bar. Dans le cas de l'huile neuve la pression fluctue en diminuant jusqu'à environ 0,55s pour se stabiliser à une valeur de 131bar

On est arrivées à valider le modèle réalisé via Simulationx en trouvant une meme allure d'évolution de la pression à la sortie du servovale que celle donnée de Gallal [GALAL, 2009]p247.

Interprétation générale

Les simulations via Simulink et SimulationX, ont permis de visualiser le comportement de l'huile dans le vérin ainsi que dans les différents composants de la servovalve.

Les résultats montrent qu'il y a une différence dans le comportement de la servovalve dans les deux cas. La vitesse diminue avec des fluctuations plus fréquentes alors que la pression augmente considérablement, ce qui peut être prouvé par le changement du comportement rhéologique de l'huile. L'augmentation de viscosité et de la densité peuvent affecter les différents composants de la servovalve qui sont très sensibles à la contamination, notamment au niveau des deux buses, car la distance qui les sépare est très faible, de l'ordre de quelques centièmes de millimètres seulement, une simple particule venant s'insérer bloque tout le mouvement et rend toute la commande inopérante.

Amélioration de la qualité d'huile et du
circuit hydraulique de la servovalve

Chapitre 6 : Amélioration de la qualité d'huile et du circuit hydraulique de la servovalve

6.1 Introduction

Dans 70% à 80% des cas, la défaillance du circuit hydraulique peut être due à la lubrification ou à la mauvaise qualité du fluide. Au cours de notre étude, nous avons constaté que l'huile utilisée actuellement présente des particules engendrant des dysfonctionnements au niveau la servovalve.

La qualité de l'huile hydraulique est un facteur primordial pour assurer un bon fonctionnement et une durée de vie appréciable à l'arrêt de la servovalve et les autres équipements du circuit .

Afin d'éliminer la contamination existante dans le système, nous allons proposer dans ce chapitre une série de solutions.

En fait, les impuretés dans le fluide peuvent provoquer une pollution, entraînant une détérioration de la surface de contact.

Par conséquent, le filtrage à haute efficacité réduira la cause de la panne, et réduisant ainsi les temps d'arrêt de la machine.

De plus, les composants qui fonctionnent dans un environnement plus favorable auront une durée de vie plus longue.

6.2 Les causes de vieillissement des huiles hydraulique

6.2.1 Les réactions chimiques

Les principaux agents présents dans les transformateurs, susceptibles de dégrader les huiles hydrauliques sont l'oxygène et l'humidité. L'oxygène est présent sous forme dissoute dans l'huile. Ces sources de vieillissement sont ainsi plus présentes dans le cas des transformateurs de puissance, qui sont dits «respirants» en contact avec le résultat de l'opération par un conservateur et d'un dessiccateur.

L'oxygène et l'humidité amènent respectivement la dégradation de l'huile par oxydation et hydrolyse. A ces deux facteurs de vieillissement « naturels », s'ajoutent deux autres catalyseurs non négligeables qui sont la température (pyrolyse) et le champ électrique. Enfin, la présence des matériaux de construction de l'appareil, tels que le fer, le cuivre ou la cellulose viennent s'ajouter aussi comme catalyseurs de vieillissement.

Mécanisme et conséquences de l'oxydation

L'oxydation de l'huile minérale résulte principalement de l'action simultanée de l'oxygène moléculaire et de la température en présence des matériaux de construction des appareils (cuivre, fer, cellulose, etc.). L'action de l'humidité et du champ électrique est encore mal

connue sur le phénomène d'oxydation. L'oxydation constitue le facteur prédominant dans le vieillissement des isolants liquides, et plus particulièrement dans celui des huiles minérales. On désigne ainsi un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissous .

Les huiles, comme tous les produits naturels s'oxydent en donnant des produits de dégradation qui se caractérisent d'abord par une évolution de la couleur et de l'odeur, liée à la formation de composés acides légers, puis par une apparition de dépôts et de résidus agressifs, liée aux acides lourds, et accompagnée en général d'une augmentation de la viscosité. Il est généralement admis que l'oxydation procède selon un mécanisme de réactions initiées par les radicaux libres (molécules ou fragments de molécules dans un état électronique excité qui ont une valence libre, et qui sont chimiquement très réactifs et électriquement neutres). De telles réactions sont dites autocatalytiques, c'est à dire que les produits formés par oxydation servent de catalyseurs.

Ainsi, pour résumer, on peut dire que les conséquences de ce phénomène d'oxydation de l'huile sont :

- une augmentation de tan et de l'acidité.
- une augmentation de la viscosité liée aux boues d'oxydation ,d'où une diminution de la capacité à éliminer les calories.
- une augmentation de la corrosivité vis-à-vis de la cellulose et des parties métalliques liée à la formation d'acides carboxyliques et
- une augmentation de la teneur en eau liée à l'oxydation.

Cela correspond à ce que nous avons trouvé dans les analyses que nous avons effectuées, et delà on a conclu que notre huile hydraulique a été oxydée.

6.2.2 La pollution

En effet, les composants hydrauliques ont une forte sensibilité aux polluants, qu'ils soient solides (joints, limaille, papier et autres fibres), liquide (eau et produits chimiques), gazeux (air). Toutes les formes de pollution nuisent au fonctionnement de l'installation, réduisent son espérance de vie. Il faut donc prendre des précautions, notamment lors du remplissage du réservoir : lors de cette opération, toutes les particules contenues dans l'air s'introduisent dans le système, même si vous utilisez un groupe de remplissage.

Il est préférable d'installer un coupleur de remplissage sur la centrale hydraulique, qui relié au groupe de remplissage, a pour avantage de ne laisser passer que l'huile.

les différentes sources de la pollution d'huile hydraulique

La contamination du fluide hydraulique peut endommager gravement les systèmes hydrauliques. Pour gérer efficacement la contamination, il est important de connaître les sources potentielles. Six sources principales de contamination des systèmes et composants hydrauliques sont identifiées, ainsi que des recommandations pour minimiser la contamination

[MAC Hydraulics, 2017].

1. Contamination du fluide hydraulique pendant la production

Les installations qui produisent du fluide hydraulique peuvent introduire par inadvertance une contamination pendant le traitement ou le mélange. Ils ont rarement le contrôle sur la façon dont le fluide hydraulique est stocké, ce qui ouvre d'autres voies de contamination. C'est pourquoi l'accent est mis sur le filtrage de tous les fluides qui entrent dans un système hydraulique.

2. Contamination du fluide hydraulique pendant le stockage

Le stockage n'est pas nécessairement l'endroit le plus sûr pour un fluide hydraulique. L'humidité peut accéder à l'intérieur des récipients en plastique scellés et imperméables par ce que l'on appelle la «respiration». La respiration devient un problème lorsqu'un contenant est exposé à des variations de température, comme des contenants entreposés à l'extérieur où le soleil pourrait briller pendant une partie de la journée. Même s'il n'est pas possible de voir une contamination par l'humidité, cela peut tout de même nuire aux performances d'un système hydraulique et au système lui-même.

3. Contamination pendant le transfert de fluide

Les fluides qui sont exposés à l'atmosphère pendant le transfert et la manipulation courent le risque d'absorber l'humidité, ainsi que d'être exposés à la poussière et à d'autres particules qui peuvent être dans l'air. Si l'environnement dans lequel le transfert a lieu n'est pas propre et que l'équipement utilisé n'est pas propre, la contamination aura très certainement lieu.

4. Contamination du fluide hydraulique intégrée

Il est fortement possible que la contamination soit intégrée dans un système hydraulique au cours du processus de fabrication. Peut-être qu'une pièce moulée en sable dans le moteur hydraulique a quelques taches de sable coulé à l'intérieur.

5. Contamination des fluides pendant le service

Pendant l'entretien, une contamination peut se produire lorsque le fluide est exposé à des températures supérieures à la normale. De plus, le fluide hydraulique se dégrade naturellement avec le temps, c'est pourquoi les fabricants recommandent de changer le fluide régulièrement.

Le fluide peut également être contaminé par l'ingestion d'air et d'humidité. Les joints peuvent être une autre source de contamination, même lorsqu'ils ne fuient pas. De minuscules particules peuvent pénétrer dans le système sur des tiges de cylindre et

dépendent de filtres internes pour les capturer.

La contamination peut également être générée par les composants eux-mêmes, comme les roulements d'un moteur hydraulique ou les joints d'une pompe hydraulique, lorsque de minuscules morceaux de particules, de métal ou de polymère se détachent et restent dans le système jusqu'à ce qu'ils soient filtrés.

6. Contamination pendant la maintenance

Enfin, une autre source notoire de contamination des fluides hydrauliques est l'entretien. Il y a tellement de façons possibles d'introduire la contamination pendant la maintenance .

6.3 Les solutions proposées

6.3.1 Les filtres

Un filtre est un dispositif dont la fonction principale est d'éliminer les contaminants insolubles du fluide, les filtres les plus courants sont constitués d'une grille dont la maille est appropriée à la taille des particules à retenir. Cette grille peut être constituée de différents matériaux : grillage, feutre, papiers, synthétiques [VEUX, 2000].

1. Principe de fonctionnement

La cellule filtrante se compose d'une armature ou d'un cadre en acier galvanisé ou en métal Acier inoxydable.

Le lut (diluant) est un produit placé dans le cadre pour assurer l'étanchéité entre le média filtrant et l'armature ; ce lut est en matière minérale ou en matière plastique. Les joints d'étanchéité amont/aval placés autour de l'armature étant en néoprène, fibres de verre ou silicone.

Les filtres du système hydraulique sont classés en fonction de la grosseur des particules qu'ils sont capables de retenir. Par exemple, un filtre de 10 μm (micron) peut conserver les particules supérieures à 10 μm .

2. Choix de filtre

Le choix du filtre et de ses dimensions dépendent des conditions techniques suivantes :

- . Type d'installation.
- . La pression de l'installation.
- . Débit d'huile au passage par l'installation.

3. Emplacement des filtres

L'emplacement du filtre dans un système hydraulique est essentiel pour garantir des niveaux acceptables de propreté des fluides et une protection adéquate des composants. La figure montre l'emplacement des différents filtres dans un système hydraulique [MESSAOUI, 2011].

- a. **A l'aspiration :** Ces filtres, appelés aussi crépines sont installés avant la pompe et ne peuvent arrêter que les grosses particules donc ils ne suffisent généralement pas à la protection du circuit [VEUX, 2000].
- b. **Au refoulement :** Le filtre est installé après la pompe (ou avant une portion de circuit) où la perte de charge est indifférente avec une maille qui peut être très fine ou tout le circuit est protégé sauf la pompe qui ne peut pas être inclut dans cette protection [VEUX, 2000].
- c. **Au retour :** Le filtre est installé sur les canalisations de retour d'huile où la totalité de l'huile est filtrée. Il permet de récupérer les débris provenant de l'usure des composants ou du circuit en général.

4. L'efficacité de filtration

La capacité d'un filtre à pouvoir capturer des particules est généralement exprimée en termes d'efficacité de filtration E . L'efficacité de filtration E d'un filtre d'une épaisseur Z est donnée par :

$$E = \frac{c_e - c_s}{c_e} \quad (6.1)$$

Où c_e et c_s sont les concentrations en particules pour une taille donnée respectivement à l'amont et à l'aval du média filtrant.

Dans l'industrie, l'efficacité du filtre est souvent mesurée en considérant le rapport de filtration β qui est défini comme étant le rapport de la concentration pour un diamètre de particules d_p donné à l'amont du filtre sur la concentration en particules de même taille à l'aval du filtre :

$$\beta = \frac{c_e(d_p)}{c_s(d_p)} \quad (6.2)$$

Le rapport de filtration est directement lié à l'efficacité fractionnelle du filtre par la relation :

$$E = 1 - \frac{1}{\beta} \quad (6.3)$$

Ainsi, pour de très grandes valeurs du rapport de filtration l'efficacité correspondante est proche de 1. Les spécifications sont en général très sévères en ce qui concerne l'efficacité de filtration qui est considérée comme le paramètre clé permettant de juger la qualité du filtre.

5. Calcul du choix du filtre

(a) **Débit d'entrée du filtre :**

Pour un taux de la rétention $\beta \geq 0,75$, on prend $\beta = 0,80$, et un débit nominale

$$Q_{nominal} = 75 \text{ l/min}$$

On calcule le débit efficace, on trouve :

$$Q_{ef} = \frac{Q_{nominal}}{0.80} \quad Q_{ef} = \frac{0.75}{0.80} = 93.75 \text{ l/min} \quad (6.4)$$

(b) **L'efficacité du filtre en quantité :**

Si on vise une efficacité de $E = 99\%$, et la concentrations des particules causant les contaminations est estimée à $C_e = 2\%$ à 5% et selon la capacité du réservoir de 200 l, on aura, pour $C_e = 2.5\%$.

$$c_e = \frac{\nu 0.025}{100} = 0.06251 = 625 \cdot 10^{-7} \text{ kg} = 625 \cdot 10^{-4} \text{ g} \quad (6.5)$$

De l'équation 6.1 :

$$C_e = 625 \cdot 10^{-4} \text{ g}$$

$$C_e - C_s = E \cdot C_e \quad (6.6)$$

$$C_s = C_e - E \cdot C_e \quad (6.7)$$

$$C_s = C_e (1 - E) \quad (6.8)$$

$$C_s = 6.25 \cdot 10^{-4} \text{ g}$$

On peut vérifier l'efficacité à partir de l'Equation 6.3 $E = 0.9875$ qui se rapproche de $E = 0.99$ Ce qui nous oblige à choisir un filtre hydraulique qui permet un passage de particules nocives à notre servovalve, une quantité de $C_e = 6.25 \cdot 10^{-4} \text{ g}$

Afin de tester l'efficacité des filtres, on a reconstruit le circuit en ajoutant un filtre à l'amont et à l'aval de la servovalve via le logiciel SimulationX. Le circuit et le résultat sont présentés ci-dessous :

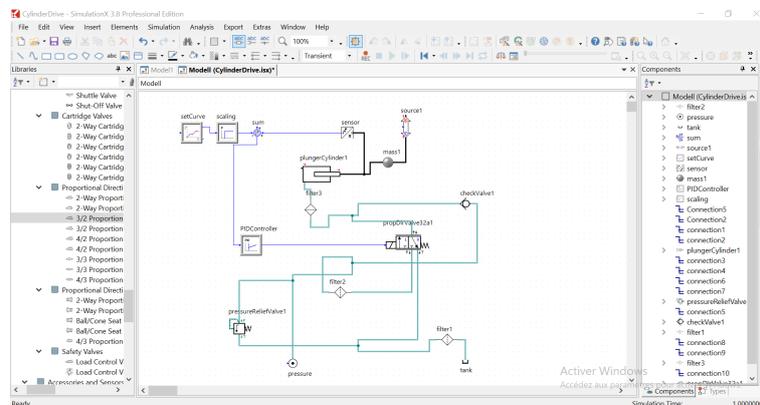


Photo 6.1 – Le circuit hydraulique de la servovalve après l'ajout des filtres)

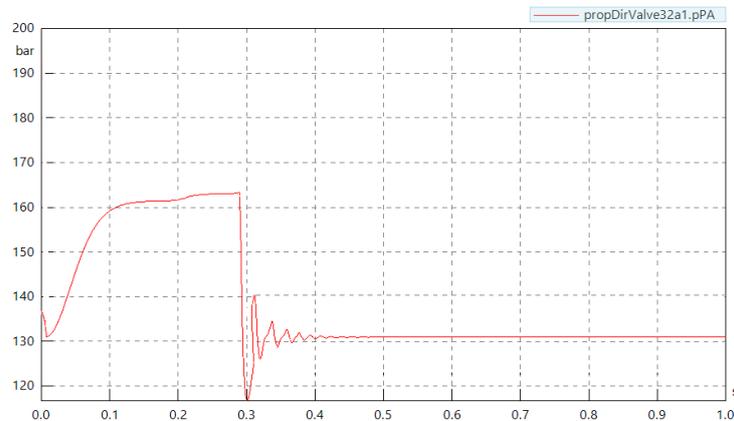


Photo 6.2 – Évolution de la pression à la sortie de la servovalve (cas de l'huile en service) après l'ajout des filtres

Interprétation des résultats

La simulation via simulationX en ajoutant les filtres au circuit actuel , nous a permis de visualiser la pression à la sortie de la servovalve dans le cas de l'huile en service . Les résultats montrent que dans ce cas, la pression de la servovalve évolue d'une manière pratiquement identique à celle dans le cas d'une huile neuve.

6.3.2 Les additifs des huiles

Les additifs sont utilisés :

- . soit pour renforcer certaines propriétés de l'huile de base.
- . soit pour apporter à l'huile de base des propriétés qu'elle ne possède pas.

Parmi ces additifs on cite :

. Les améliorants de viscosité

Ils permettent à l'huile d'être suffisamment fluide à froid et visqueuse à chaud pour éviter le contact des pièces en mouvement. Ce sont des polymères introduits dans une base lubrifiante. Une huile contenant ces additifs est dite multigrade. Les polymères à longue chaîne se contractent à basse température et n'offrent ainsi qu'une résistance négligeable au mouvement des molécules d'huile mais, à haute température, ils se déroulent et s'opposent à la fluidification du mélange.

- . **Les additifs antioxydants** Ils ralentissent les phénomènes d'oxydation des huiles hydrauliques et contribuent à l'espacement des vidanges par une meilleure tenue aux hautes températures [COUDRE, 2018].

- . **Les additifs de basicité** Ils neutralisent les résidus acides , au fur et à mesure de leur formation.

- . **Les additifs dispersants** Ils maintiennent en suspension toutes les impuretés solides formées au cours de service : imbrûlés, gommages, boues, dépôts nettoyés par les détergents. Ils empêchent les résidus solides de s'agglomérer et ainsi limitent le risque de dépôt (boues) dans les parties froides des instruments du circuit [COUDRE, 2018].

- . **L'additive anticorrosion** Ils empêchent l'attaque des métaux ferreux, attaque due à l'action conjuguée de l'eau, de l'oxygène de l'air et de certains oxydes formés lors de la combustion. Ils forment un film protecteur ou une passivation de la surface à protéger [COUDRE, 2018].

- . **L'additive anti-congélation** Ils permettent à l'huile de garder une bonne fluidité à basse température (de -15C à -45C) [COUDRE, 2018].

- . **Les additifs anti-mousse** Le moussage de l'huile peut être dû à la présence d'autres additifs (les additifs détergents agissent dans l'huile comme du savon dans l'eau : ils nettoient le moteur mais ont tendance à mousser) ou au dessin du circuit de graissage qui provoque des turbulences lors de l'écoulement du lubrifiant, facilitant ainsi le brassage air huile et la formation des bulles. Ces additifs ont pour but de limiter la dispersion d'un grand volume d'air dans l'huile [COUDRE, 2018].

6.3.3 La maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive ou la maintenance technique planifiée comprend le fonctionnement de l'équipement sur une base régulière ou selon des normes prédéfinies. Son objectif principal est de réduire le risque de défaillance de l'équipement.

Tableau 6.1 – Gamme de maintenance préventive conditionnelle

N°	Désignations des opérations	périodicité	Consommable	Outillage	Personnel	Durée
1	Rinçage	Avent mise en service	/	/	Hydraulicien	15min
2	Contrôler le débit à l'entrée et sortie	08h	/	Débitmètre	Hydraulicien	5min
3	Contrôler la pression à l'entrée et sortie	08h	/	Manomètre	Hydraulicien	5min
4	Contrôler le signal de commande	08h	/	Test valve	Electricien	10min
5	Analyse d'huile	62h	/	Laboratoire	Agent	30min
6	Contrôle thermographique de la servovalve	62h	/	Thermographe	Mécanicien	10min
7	Vérification fuite d'huile	08h	/	Visuel	Mécanicien	5min
8	Nettoyage	08h	/	Visuel	Agent	10min

Conclusion générale

L'objectif de notre étude est d'étudier l'impact de la contamination d'huile hydraulique sur le fonctionnement de la servovalves responsable du contrôle de la vanne de réglage du gaz combustible (GCV) en prenant comme cas la centrale électrique à cycle combiné de Hajdret Ennous, 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 hydraulique 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 contamination d'huile sur la servovalve, nous avons réalisé deux simulations à l'aide de deux logiciels : Simulink et SimulationX. Ces dernières ont montré qu'il y a un changements significative de la pression et la vitesse au niveau de la servovalve et ces composants . Ce phénomène entraîne forcément une dégradation du matériau de la servovalve.

Notre étude sur le dysfonctionnement de la servovalve qui est importante pour une meilleure prise en charge du point de vue maintenance et amélioration constructive. Et à la lumière des résultats obtenus, nous avons pu valider nos hypothèses concernant le dysfonctionnement de cette dernière à savoir la contamination d'huile et l'augmentation de la pression dans la servovalve.

En dernier, nous avons présenté des solutions pratique pour maintenir les caractéristiques fonctionnelles de la servovalve en intégrant des filtres en amont et en aval afin de diminuer la contamination de l'huile hydraulique.

Et pour mettre fin à au phénomène de contamination qui affecte négativement l'installation étudiée, on a proposé l'ajout des additifs d'huile freinant le développement de ce phénomène.

Toujours dans le même aspect, et pour une meilleure disponibilité de ce système, nous

avons établi une gamme d'entretien préventif conditionnelle.

Toutes ces approches vont assurer un meilleur rendement de l'installation.

Bibliographie

AYEL, Jean. Lubrifiants et fluides pour l'automobile. Edition technip. Publication de l'institut français du pétrole, 1998, 297 p.

BELLALAH, Sami. L'hydraulique industrielle. Cours et exercices corrigés Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, 2014, pp.20-33 [en ligne], Disponible sur : <https://frscribd.com/doc/74612880/2-Hydraulique-Industriel>.

BOUAJILA, Sofiane. Transmission des puissances hydrauliques et pneumatiques, cours de l'institu supérieur, 2016, 95 p.

BOUKHOULDA, Abdelaziz. Commande hydraulique et pneumatique. Université de Sidi Bel Abbès, Faculté de génie électrique, Département d'automatique, 2015, pp.10-15.

COUDRE, Christian. La lubrification.[en ligne], Disponible sur : <http://tpmattitude.fr/lubrification.html>.2018.

DALLEMAGNE, Gérard. Fluides hydrauliques Fonctions et Classification. Techniques de l'ingénieur, 1999, pp.2-5. ISBN 0340676523.

DALLEMAGNE, Gérard. Facteurs d'influence Fonctions et Classification. Techniques de l'ingénieur, 1999, pp.2-4 ISBN 0340676523.

DEL GUSTA, Roberto. K V - Stop Ratio Valve (SRV). pp 90-93. 2002.

DODDANNAVAR, Ravi. Practical Hydraulic Systems : Operation and Troubleshooting for Engineers and Technicians - 1st Edition. Elsevier Science Technology Books, 2005, p.34-40. ISBN075066276X.

EVANS, John. L'augmentation et la diminution de la viscosité. Article vol 1.n38. 2016, 20 p.

FAULKNER, Lyn. Handbook of hydraulic fluid technology. MECHANICAL ENGINEERING. GEORGE. TOTEN, 1999, pp.40-45, ISBN 0340676523.

GALAL, Rabie. Fluid Power Engineering. McGraw Hill Professional, 2009, 448 p.

General Electric. 9f.05 gas turbine(50hz), [en ligne], Disponible sur : <https://www.ge.com/power/gas/gas-turbines/9f-05>, 2020.

General Electric. Gas turbine fuels equipment services solutions[en ligne], Disponible sur : <https://www.ge.com/power/gas/fuel-capability/equipment>, 2020.

HERBERT, Merritt. Hydraulic control system. John WileySons, 1967, p.40_44. ISBN047159675.

HODGES, Peter. Fluid Power Dynamics. Butterworth-Heinemann Ltd, 1999, 167 p. ISBN 0340 676523.

Insitu Experts. Préconisation procédures hydrauliques [en ligne], Disponible sur : <https://experts-insitu.com>, 2017.

JUNQUERA, Steven Patrick. Gas turbine combined lift/ hydraulic system. General Electric Co, 2018.

Massachusetts institute of technology. Brayton cycle. [en ligne], Disponible sur : <https://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node27.html>, 2018.

MAC Hydraulics. Sources of hydraulic fluid contamination in your hydraulic systems, 2017. [en ligne], Disponible sur : <https://mac-hyd.com/>

MATLAB. Simscape fluids, model and simulate fluid systems. [en ligne], Disponible sur : <http://www.mathworks.com/products/simscape-fluids.html>, 2020.

MESSAOUI, Mosbah. Systemes hydrauliques. Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Gafsa, Département de Génie Mécanique, 2011, 65p. ISBN 2-00-100701-9.

MICHEL, Sebastian et WEBER, Jürgen. Investigation of self contamination of electrohydraulic compact drives. The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power, 2017, 7 p.

MOBLEY, Keith. Hydraulic Fluids. Plant Engineering Maintenance Series. Butterworth Heine mann Ltd, 1996. ISBN 978-0-7506-7174-3.

REKKIK, Sami. Circuit hydraulique : conception et maintenance, 2015, 99 p. [en ligne], Disponible sur : <https://docplayer.fr/1179170-Circuits-hydrauliques.html>.

SimulationX. [en ligne], Disponible sur : <https://www.simulationx.com/>, 2020.

SIVARMAN Ilango. Hydraulics and Hydraulic Circuits : Industrial Oil Hydraulics, 2016, 223 p.

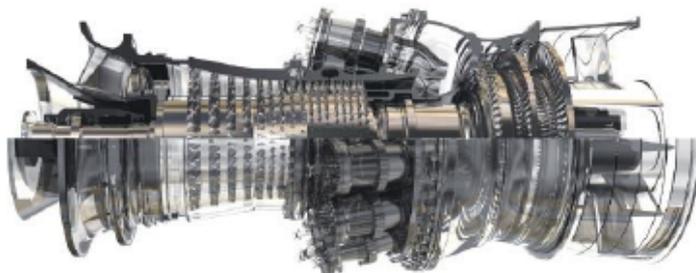
SNC LAVALIN. Skikda combined cycle power plant. [en ligne], Disponible sur : <https://careers.snclavalin.com/projects/2019-5/skikda-combined-cycle-power-plant-hadjret-en-nouss-and-fouka-desalination-plant>, 2019.

SNC LAVALIN. Rapport « étude de danger de la station de hadjret enouss ». Rapport interne de l'entreprise, 2008, 30 p.

The Nuclear Regulatory Commission. Steam and power conversion system. Disponible sur : <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1793/initial/chapter10>, 2017.

VEUX, Jean-Jacques. Hydraulique industrielle. Cours, 2000, 113 p, ISBN 2-00-100701-9

Annexes



Annexe .1 – Turbine à gaz GE de type "9FB".



Annexe .2 – Turbine à Vapeur GE Alstom A15.



Annexe .3 – Essai d'indice d'acide



Annexe .4 – Essais de masse volumique au pycnomètre