

MODELISATION ET SIMULATION DES SYSTEMES DE LUBRIFICATION DU MOTEUR

RAMIELSON Luis Rufin^(*), RAJAONARISON Eddie Frank, RANDRIAMOROSATA Josoa, BOURGEON Andy Marlon ,
RAKOTOARISOA Haga Johary, RAJOMALAHY Julien

Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra

(*) Auteur correspondant, e-mail : rufinluisramielson@gmail.com

Antananarivo 101, Madagascar

Mots clés : Modélisation, simulateur, optimisation, lubrification, moteur

RESUME

Cette étude concerne l'optimisation de la gestion de maintenance de tracteurs dans un parc de matériels d'une entreprise agricole et la modélisation de système de lubrification de tracteurs. L'objectif de cette étude est de modéliser le système de lubrification de tracteurs afin d'évaluer ou dégager les indices qui puissent restituer l'état de dégradation d'huile dans le carter. En effet ce travail présente un modèle orienté envers le développement d'un simulateur pour le moteur diesel. Dans le but d'avoir un simulateur qui répond aux besoins du moteur étudié au niveau de l'efficacité, la rapidité et la prise en considération des défauts, le modèle étudié est basé sur des modélisations physiques, semi physiques, empirique, mathématique et thermodynamique. Le modèle du moteur est divisé en plusieurs sous modèles dont chacun présente un système réel. Ces systèmes sont : le refroidissement, la lubrification, l'admission de l'air, l'injection, la combustion et les émissions. Les sous-modèles et les caractéristiques dynamiques de chaque bloc sont conçus en respectant les équations principales du fonctionnement du moteur, ainsi que les données expérimentales collectées sur un banc d'essai pour un moteur, sur terrain suivant les heures de marches et suivi de prélèvement d'échantillon d'huile en vue d'analyse. Ce modèle a été implémenté sur Matlab/Simulink, et la simulation permet d'obtenir les variables suivantes dans les différentes sous-blocs: pression, température, efficacité, échange de chaleur, angle de vilebrequin, débit de fuel et émissions. Le simulateur sera utilisé pour montrer les dégradations dans les performances du moteur lors de l'occurrence des défauts et peut aider dans l'application des stratégies de diagnostic et pronostic.

1. INTRODUCTION

Le contexte mondial de maintenance, face à l'après-guerre mondiale et à la mondialisation de l'économie, l'évolution de la technologie de pointe sur les véhicules et les tracteurs dans les usines et dans les entreprises agricoles et d'un côté l'existence de défaillances, pannes répétitives et la tendance à l'immobilisation des automobiles et des tracteurs ayant de l'impact sur leur économie, qui se sont passés aux Etats-Unis, en Asie plus précisément au Japon et en Europe également, ont révolutionné le monde de la maintenance et ont poussé les ingénieurs chercheurs à s'investir à fonds dans la recherche de nouvelle stratégie de la maintenance. [1]

En relativisant cette situation à Madagascar, le développement de la motorisation agricole, y compris la maintenance, est encouragé et promu par le Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche, mais cette promotion demeure malheureusement un peu insuffisante. L'attachement de la population à la maintenance reste froid, elle se sent ignorante et elle se fait docteur à soi-même ou s'automédicalise en terme de maintenance et donc le coût de maintenance grandissante se fait sentir.

De là, la problématique se pose comment résoudre l'existence de défaillances, pannes répétitives et la tendance à l'immobilisation totale des automobiles et des tracteurs, source de récession de la production dans l'entreprise agricole ?

Les hypothèses de recherche avancées sont de poser l'idée de l'intelligence artificielle. A cet effet, la recherche effectuée sur la thèse est de modéliser le système de carter d'huile dynamiquement et mathématiquement en associant les paramètres d'entrée et ceux de la sortie par l'idée de l'intelligence artificielle afin de restituer l'état de viscosité d'huile qui est déjà dégradé sous forme d'huile usée.[2...8]

En vue d'avoir une gestion de maintenance prospère et durable, nombreux sont les visions pragmatiques et durables pour atteindre les objectifs. A cet effet, une entreprise agricole doit donner la priorité au freinage ou au palliatif des usures afin d'obtenir la longévité des matériels. La sécurité des hommes et de produits et notamment la qualité de ces derniers est incontournable car elle est très indispensable pour les profits de l'entreprise. La protection de l'environnement fait partie en premier rang de l'agenda de l'entreprise pour le bien de l'humanité. L'optimisation des coûts de maintenance n'est pas en reste pour une meilleure gestion. La gestion de stock de pièces de rechange et de pièces consommables est inévitable pour contourner la rupture de stock. La gestion de l'administration et de personnel tient une place importante puisque elle est indéniable pour y parvenir l'objectif. La diminution de la probabilité de défaillances, de pannes répétitives en service et la réduction de coût de défaillances sont les priorités pour pouvoir augmenter la fiabilité et améliorer la disponibilité de moteurs. La prévention et aussi prévision des interventions coûteuses de maintenance corrective sont de mise afin d'atteindre l'objectif qu'on s'est fixé. L'évitement des consommations anormales d'énergie, de lubrifiants, et de pièces détachées sont obligatoire puisque ceux-ci sont la source de récession de la production dans l'entreprise agricole. La diminution de budget de maintenance s'avère aussi très nécessaire car le budget est le pilier de toute la gestion de maintenance[9]

Il faut dire que l'enjeu est de taille, celui de faire du tracteur en quelque sorte une maintenance rationnelle et à bon escient, en l'occurrence la maintenance préventive, si l'on tient vraiment à ce que le constructeur recommande, c'est-à-dire d'appliquer à la lettre la notice de maintenance du tracteur ou le manuel d'utilisation, en d'autres termes on sera loin de défaillances, de pannes répétitives afin d'avoir un rendement meilleur de travail, des retombées économiques, scientifiques et professionnels au niveau de la population.[10]

1.1. Présentation du nouveau système de lubrification

1.1.1. Eléments constitutifs du système

Le système de lubrification représenté ci-dessous comporte les éléments suivants :

- ❖ Moteur à explosion
- ❖ Carter d'huile,
- ❖ Pompe à huile,
- ❖ Soupape à décharge,
- ❖ Filtre à huile
- ❖ Soupape de retour,
- ❖ Radiateur d'huile,
- ❖ Deux capteurs de niveau (haut et bas) dans le carter d'huile,
- ❖ Un capteur de proximité pour chaque point de lubrification,
- ❖ Capteurs de température
- ❖ Deux vannes (électrovanne proportionnelle) de réglage de débit (entrée et sortie dans le réservoir),
- ❖ Une vanne de réglage de débit pour chaque point de lubrification,
- ❖ Circuit de conduite d'huile vers le carter d'huile et les points de lubrification.

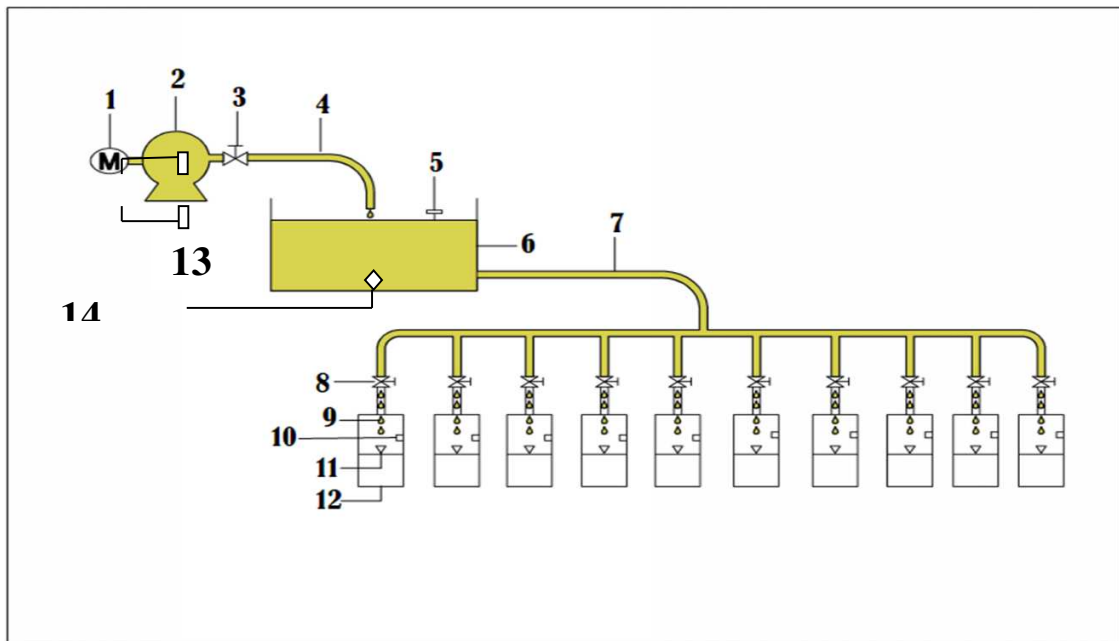


Figure 1 : Présentation de système de lubrification modélisée.

❖ Tableau 1 : Nomenclature de système de lubrification modélisée.

N°	Désignation
01	Moteur à explosion
02	Pompe à huile
03	Vanne de réglage de débit de sortie vers le carter d'huile
04	Conduite d'huile vers le carter
05	Vanne de réglage de niveau d'huile dans le carter
06	Carter d'huile
07	Conduite d'huile vers les points de lubrification
08	Vanne de réglage de débit d'entrée dans les points de lubrification
09	Huile lubrifiante chaque point de lubrification
10	Capteur de proximité de niveau monté dans chaque point de lubrification
11	Capteur de proximité de température dans chaque point de lubrification
12	Point de lubrification
13	Capteur de réalisation de restitution de viscosité dégradée
14	Capteur de niveau (haut et bas) d'huile dans le carter

1.1.2. Principe de fonctionnement

Une pompe à huile associée à un tamis, alimentée par un moteur à explosion transporte l'huile de la source, du carter d'huile puis passe à une soupape décharge si cela est nécessaire due à une surpression et décharge l'huile et ensuite repart pour le radiateur d'huile à travers un circuit de conduite. Ensuite l'huile arrive à la rampe principale de graissage et cela que commence la lubrification, à commencer par les paliers principaux et canaux obliques forés du vilebrequin par pression, en passant par les paliers de bielles, axes du piston par pression également, chemises par barbotage, axe des culbuteurs, tiges, poussoirs et arbre à cannes par gravitaire jusqu'à son retour vers le carter d'huile. A noter que la pompe à huile alimente les points de lubrification à travers la vanne d'entrée (électrovanne proportionnelle) de débit volumétrique $Q_e(t)$ et la vanne de sortie à chaque point de lubrification $Q_s(t)$. A l'aide de la vanne de réglage automatique, l'électrovanne associée à cette vanne permet de régler ce débit dans le système réglé. La régulation de débit se fait grâce au régulateur.

Le carter d'huile constitue en outre une réserve d'huile pour les besoins chaque point de lubrification. Il dispose d'une alimentation depuis la pompe et d'une évacuation vers les pièces à lubrifier. Le volume d'huile stocké dans le carter peut varier en fonction de la

consommation au cours du temps. La quantité d'huile $Q(t)$ dans le carter est mesurée par les capteurs de niveau qui sont montés en haut et au fond du réservoir. La régulation de niveau se fait à l'aide d'un régulateur de niveau. [30, 31, 32]

La distribution d'huile dans les points de lubrification se fait au moyen des circuits de conduite d'huile qui relient le carter d'huile aux pièces à lubrifier. L'évacuation d'huile à la sortie du carter d'huile se fait par pression. Le débit d'huile évacué dans le réservoir vers les pièces à lubrifier est réglé à l'aide de la vanne (électrovanne proportionnelle) de réglage de débit sortant dans le carter mais entrant dans les points de lubrification. L'huile est enfin distribuée dans les points de lubrification par un réseau de distribution grâce à la pression exercée. [30, 31, 32]

Il y a un capteur de proximité monté dans chaque point de lubrification. Ce capteur détecte les pièces à lubrifier à proximité et envoie un signal de commande pour l'ouverture et la fermeture de la vanne de réglage de débit d'huile entrant dans les points à lubrifier. [30, 31, 32]

2. MODELISATION MATHÉMATIQUE DU SYSTÈME DE LUBRIFICATION

- ❖ Introduction
- ❖ Etablissements du schéma de principe du système de lubrification,
 - ❖ Représentation par bloc du système,
 - ❖ Description du système par des équations mathématiques : introductions des grandeurs relatives,
 - ❖ Etablissements des équations différentielles régissant les phénomènes physiques,
 - ❖ Détermination des séries d'équations différentielles et des conditions initiales,
 - ❖ Linéarisation des équations différentielles,
 - ❖ Résolutions des équations,
 - ❖ Transformation de Laplace et fonction de transfert,
 - ❖ Stabilité des résultats. [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 45, 46, 47]



Figure 2 : Modélisation du système de lubrification

- P1 : Pression d'entrée
- P2 : Pression de sortie,
- T1 : Température d'entrée,
- T2 : Température de sortie,
- Qe: Débit d'entrée dans le carter,
- Qs: Débit sortie dans le carter,
- q : Quantité d'huile dans le carter,
- L1 : Ecart de la vanne de réglage de débit d'entrée,
- L2 : Ecart de la vanne de réglage de débit de sortie
- Sr: Section du carter

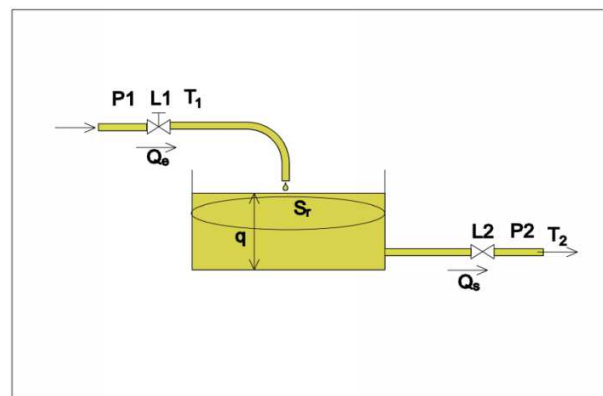


Figure 3 : Modélisation mathématique du système de lubrification

Pour modéliser ce système, nous allons utiliser l'équation de bilan de masse en considérant que la section du carter d'huile est constante [34], [35], [36], [37], [38]. On peut écrire que :

La dérivée de l'énergie accumulée est égale à l'entrée moins (-) la sortie du cuve
 MADA-HARY, ISSN 2410-0315, vol. 9, 2020

$$m(t) = S\rho g(t)$$

Avec m : masse
 S : section du carter d'huile
 ρ : masse volumique (ρ=0.89 g/cm³)
 g : accélération du pesanteur (g=9.8).

Aide de la conservation de débit massique et le développement de Taylor, on peut déterminer la fonction de transfert de processus. Le débit massique est varié en fonction de la pression (P), quantité (Q), la course de la vanne(L) et la température (T).

$$Q_e(t) = Q_e[p_1(t), q(t), l_1(t), T_1(t)]$$

$$Q_s(t) = Q_s[p_2(t), q(t), l_2(t), T_2(t)]$$

$$\frac{dm_{ac}}{dt} = (E - S)$$

Donc le bilan de l'équation en choisissant les paramètres est [34...38] :

$$Q_e[p_1(t), q(t), l_1(t), T_1(t)] = S\rho \frac{dq(t)}{dt} + Q_s[p_2(t), q(t), l_2(t), T_2(t)]$$

$$S\rho \frac{dq(t)}{dt} = Q_e[p_1(t), q(t), l_1(t), T_1(t)] - Q_s[p_2(t), q(t), l_2(t), T_2(t)]$$

$$Q_e[p_1(t), q(t), l_1(t), T_1(t)] - Q_s[p_2(t), q(t), l_2(t), T_2(t)]$$

On utilise le développement de Taylor ou ordre de Taylor

Remarque :

On néglige les valeurs absolues et les parties linéaires

Pour l'entrée

$$Q_e[P_1, q, l_1, T_1] = Q_e(P_{1_0}, q, l_1, T_{1_0}) + \frac{\delta Q_e}{\delta P_1} (P_1 - P_{1_0}) + \frac{\delta Q_e}{\delta q} (q - q_0) + \frac{\delta Q_e}{\delta l_1} (l_1 - l_{1_0}) + \frac{\delta Q_e}{\delta T_1} (T_1 - T_{1_0})$$

$$\frac{\delta Q_e}{\delta q} \text{ comme } \left[\frac{\delta Q_e(P_1, q, l_1, T_1)}{\delta q} \right] q$$

$$= q_0$$

$$\frac{\delta Q_e}{\delta P_1} \text{ comme } \left[\frac{\delta Q_e(P_1, q, l_1, T_1)}{\delta P_1} \right] P_1$$

$$= P_{1_0}$$

$$\frac{\delta Q_e}{\delta T_1} \text{ comme } \left[\frac{\delta Q_e(P_1, q, l_1, T_1)}{\delta T_1} \right] T_1$$

$$= T_{1_0}$$

$$\frac{\delta Q_e}{\delta l_1} \text{ comme } \left[\frac{\delta Q_e(P_1, q, l_1, T_1)}{\delta l_1} \right] l_1$$

$$= l_{1_0}$$

Pour la sortie :

$$Q_s[P_2, q, l_2, T_2] = Q_s(P_{2_0}, q, l_2, T_{2_0}) + \frac{\delta Q_s}{\delta P_2} (P_2 - P_{2_0}) + \frac{\delta Q_s}{\delta q} (q - q_0) + \frac{\delta Q_s}{\delta l_2} (l_2 - l_{2_0}) + \frac{\delta Q_s}{\delta T_2} (T_2 - T_{2_0})$$

D'après la résolution, on a :

$$Q_e[P_{1_0}, q, l_1, T_{1_0}] = S_p \frac{dq_0}{dt} + Q_s[P_{2_0}, h, l_{2_0}, T_{2_0}]$$

$$S_p \frac{d(q - q_0)}{dt} + \left(\frac{\delta Q_s}{\delta q} - \frac{\delta Q_e}{\delta q} \right) (q - q_0) = \frac{\delta Q_e}{\delta P_1} (P_1 - P_{1_0}) + \frac{\delta Q_e}{\delta l_1} (l_1 - l_{1_0}) +$$

$$\frac{\delta Q_e}{\delta T_1} (T_1 - T_{1_0}) + \frac{\delta Q_s}{\delta P_2} (P_2 - P_{2_0}) + \frac{\delta Q_s}{\delta l_2} (l_2 - l_{2_0}) + \frac{\delta Q_e}{\delta l_1} (T_2 - T_{2_0})$$

Remplaçons :

Masse = τ

Dérivée = Δ

Alors, on écrit l'équation

$$\tau \frac{d \Delta q(t)}{dt} + \Delta q(t) = S P_1 \Delta P_1(t) + S l_1 \Delta l_1(t) + S T_1 \Delta T_1(t) + S P_2 \Delta P_2(t) + S l_2 \Delta l_2(t) + S T_2 \Delta T_2(t)$$

q: c'est une valeur réglable ou on exprime X

l₁ : c'est une valeur active on exprime Y

P₁, T₁, P₂, l₂, T₂ : ce sont des valeurs de perturbation on exprime Z₁, Z₂, Z₃, Z₄, Z₅

$$\tau \frac{d \Delta x(t)}{dt} + \Delta x(t) = S z_1 \Delta z_1(t) + S y \Delta y(t) + S z_2 \Delta z_2(t) + S z_3 \Delta z_3(t) + S z_4 \Delta z_4(t) + S z_5 \Delta z_5(t)$$

Donc, en posant :

$$\Delta z_1 = 0$$

$$\Delta z_3 = 0$$

D'où

$$\tau \frac{d \Delta x(t)}{dt} + \Delta x(t) = S y \Delta y(t) + S z_2 \Delta z_2(t) + S z_4 \Delta z_4(t) + S z_5 \Delta z_5(t)$$

En utilisant la transformation de la Place, [34]

D'après l'équation dynamique :

$$\mathbb{T} \frac{d \Delta x(t)}{dt} + \Delta x(t) = S_y \Delta y(t) + S_{z_2} \Delta z_2(t) + S_{z_4} \Delta z_4(t) + S_{z_5} \Delta z_5(t)$$

En supposant que les conditions initiales soient nulles, la transformation de Laplace de cette équation différentielle est :

$$\Delta x(t)$$

$$\Delta y(t) \rightarrow \Delta Y(p)$$

$$\Delta z_2(t) \rightarrow \Delta Z_2(p)$$

$$\Delta z_4(t) \rightarrow \Delta Z_4(p)$$

$$\Delta z_5(t) \rightarrow \Delta Z_5(p)$$

$$\Delta x(t) \frac{d \Delta x(t)}{dt} \rightarrow P. \Delta X(p)$$

Alors, la transformée de Laplace de l'équation différentielle devient : [34...39]

$$\mathbb{T}. P. \Delta X(P) + \Delta X(P) = S_Y \Delta Y(P) + S_{Z_2} \Delta Z_2(P) + S_{Z_4} \Delta Z_4(P) + S_{Z_5} \Delta Z_5(P)$$

Ce qui signifie :

$$(1 + \mathbb{T}. P) (\Delta X(P) = S_Y \Delta Y(P) + S_{Z_2} \Delta Z_2(P) + S_{Z_4} \Delta Z_4(P) + S_{Z_5} \Delta Z_5(P)$$

En vue d'obtenir la fonction de transfert du carter d'huile et vanne,

d'après la transformation de Laplace, on étudie la fonction de transfert du système [40]

Ici on a quatre solutions, prenons:

$$F1(P) = \frac{\Delta X(P)}{\Delta Y(P)}$$

$$F1(P) = \frac{\Delta X(P)}{\Delta Y(P)} = \frac{S_Y}{1 + \mathbb{T}P}$$

$$F2(P) = \frac{\Delta X(P)}{\Delta Z_2(P)}$$

$$F2(P) = \frac{\Delta X(P)}{\Delta Z_2(P)} = \frac{S_{Z_2}}{1 + \mathbb{T}P}$$

$$F3(P) = \frac{\Delta X(P)}{\Delta Z_4(P)}$$

$$F3(P) = \frac{\Delta X(P)}{\Delta Z_4(P)} = \frac{S_{Z_4}}{1 + \mathbb{T}P}$$

$$F4(P) = \frac{\Delta X(P)}{\Delta Z_5(P)}$$

$$F4(P) = \frac{\Delta X(P)}{\Delta Z_5(P)} = \frac{S_{Z_5}}{1 + \mathbb{T}P}$$

Avec :

En posant $K_1 = S_Y$, $K_2 = S_{Z_2}$, $K_3 = S_{Z_4}$, $K_4 = S_{Z_5}$ l'équation devient :

$$F_1(P) = \frac{K_1}{1 + \tau P}$$

$$F_2(P) = \frac{K_2}{1 + \tau P}$$

$$F_3(P) = \frac{K_3}{1 + \tau P}$$

$$F_4(P) = \frac{K_4}{1 + \tau P}$$

Avec : τ : constante de temps,

K_1, K_2, K_3 et K_4 : gain du système carter d'huile et vanne

Or :

$$K_1 = S_Y = \frac{\Delta X}{\Delta Y} = \frac{X - X_0}{Y - Y_0}$$

$$K_2 = S_{Z_2} = \frac{Q - Q_0}{\Delta Z_2} = \frac{X - X_0}{Z_2 - Z_{20}} = \frac{Q - Q_0}{I_2 - I_{20}}$$

$$K_3 = S_{Z_4} = \frac{\Delta X}{\Delta Z_4} = \frac{X - X_0}{Z_4 - Z_{40}} = \frac{Q - Q_0}{T_1 - T_{10}}$$

$$K_4 = S_{Z_5} = \frac{\Delta X}{\Delta Z_5} = \frac{X - X_0}{Z_5 - Z_{50}} = \frac{Q - Q_0}{T_2 - T_{20}}$$

D'où, la fonction de transfert du système est :

$$H(P) = \frac{K_1}{1 + \tau P} + \frac{K_2}{1 + \tau P} + \frac{K_3}{1 + \tau P}$$

Le système est monté en série, alors :

$$H(p) = F_1(p) + F_2(p) + F_3(p) + F_4(p) \quad [39, 40]$$

$$H(P) = \frac{K_1 + K_2 + K_3 + K_4}{1 + \tau P}$$

3. SIMULATION ET REALISATION

Les données d'entrées et les paramètres calculés au cours de la simulation sont :

Carter d'huile et vanne :

- Carter d'huile : section de base $S=0.78\text{m}^2$, $Q=11.2\text{L}$, $H_o=0\text{L}$
- Ouverture de la vanne : 0-10mm,
- Température : Maximale : 83°C et Minimale 68°

La fonction de transfert $H(P)$ du carter d'huile + vanne est :

$$[39, 40, 41, 42, 43, 44, 49]$$

❖ On calcule d'abord K_1 , K_2 , K_3 et K_4

Suivant les données ci-dessus qui permettent de calculer K_1 , K_2 , K_3 et K_4

Alors:

$$K_1, =1.1, K_2, =1.1, K_3=0.001 \text{ et } K_4=0.0007$$

❖ Ensuite τ

$$\tau = \text{masse} = S\rho g$$

Avec $S=0.78 \text{ m}^2$, $\rho=0.89 \text{ g/cm}^3$ et $g=9.8 \text{ N.m}$

$$\tau = 6.8$$

Le régulateur est configurable en PID

Alors, la fonction du transfert du système est :

$$Hs(p) = \frac{2.2}{6.8p + 1}$$

Le schéma bloc-SIMULINK [48] pour analyser la réponse du système est représenté ci-après (figure 4) [8, 31, 50] :

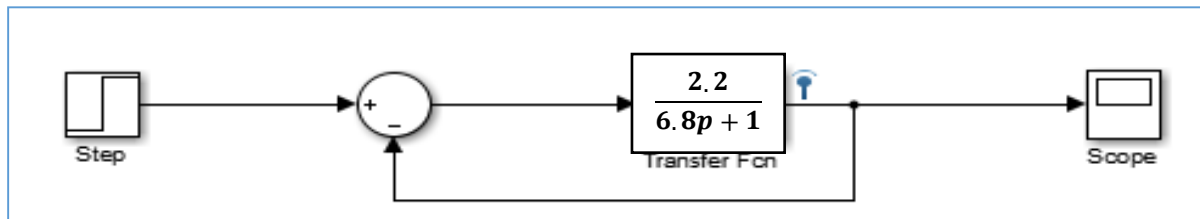


Figure 4 :Bloc d'une étude temporelle par SIMULINK [48]

4. RESULTATS ET INTERPRETATION

La figure 5 suivante montre l'indice de performances pour la réponse indicielle du système

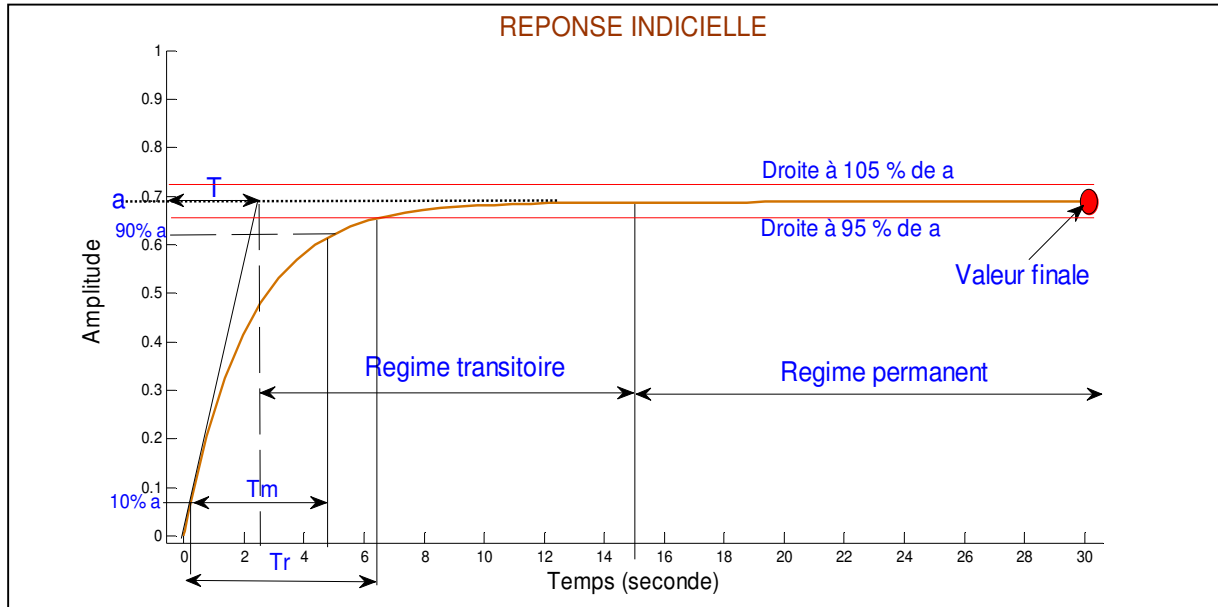


Figure 5 : Indices de performances du système

Dans notre système, nous avons utilisé un correcteur proportionnel intégral dérivé (PID),

(Contrôle avec PID) [8], [31], [50]

Le correcteur PID agit de manière :

- ❖ Action proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain G ,
- ❖ Action intégrale : l'erreur est intégrée et divisée par un gain T_i ,
- ❖ Action dérivée : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain T_d .

Le schéma bloc-SIMULINK [48], pour analyser l'effet d'un régulateur P est représenté comme suit [8,31, 50] :

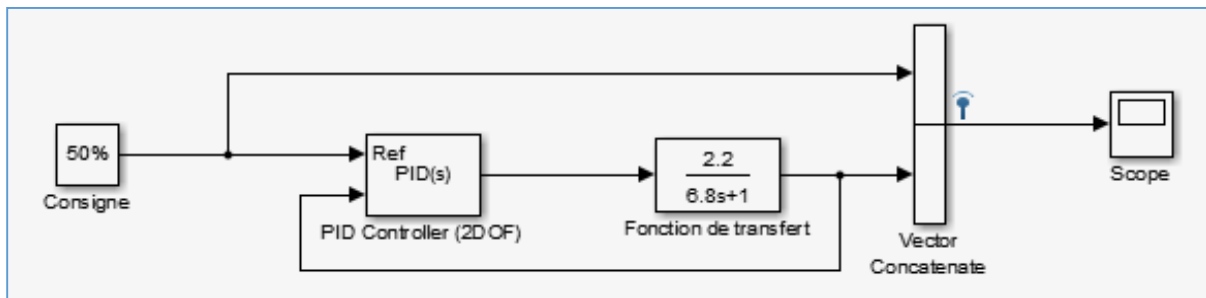


Figure 6: Représentation PID du système par schéma bloc SIMULINK [48]

❑ Effet d'un régulateur P

Consigne =50%

$K_p= 1, K_i=0, K_d=0$

Alors, la courbe de réponse est :

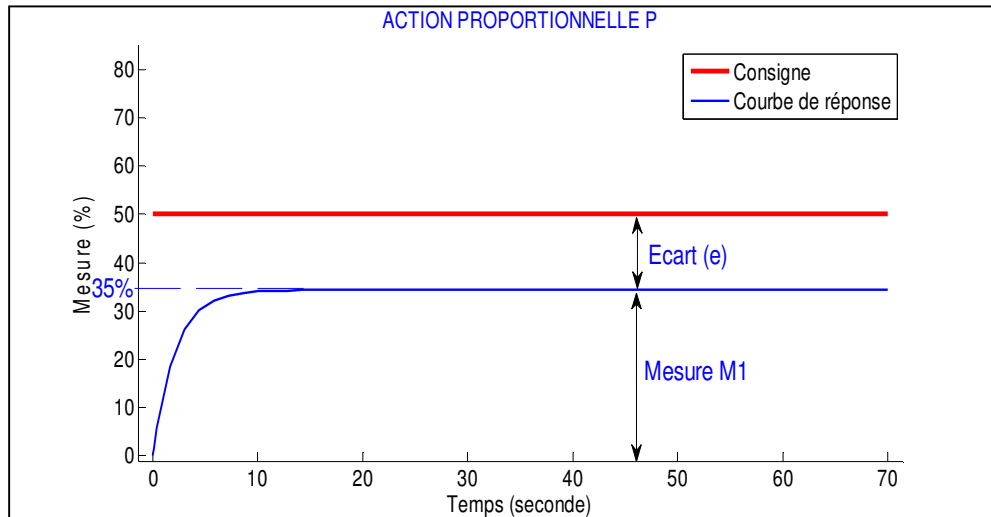


Figure 7 : Courbe de réponse du système à action Proportionnelle

❑ Interprétation

D'après cette figure, on voit que la courbe rouge représente la consigne (50%) que l'on désire atteindre. La courbe bleue désigne le gain K_p ($K_p=1$). Ici, on trouve un écart entre la consigne et la mesure (valeur obtenue $K_p=1$)

❑ Effet d'un régulateur PI

On configure le régulateur de la manière suivante :

Consigne =50%

$K_p= 1, K_i=0,1 K_d=0$

Alors, les courbes de réponse sont :

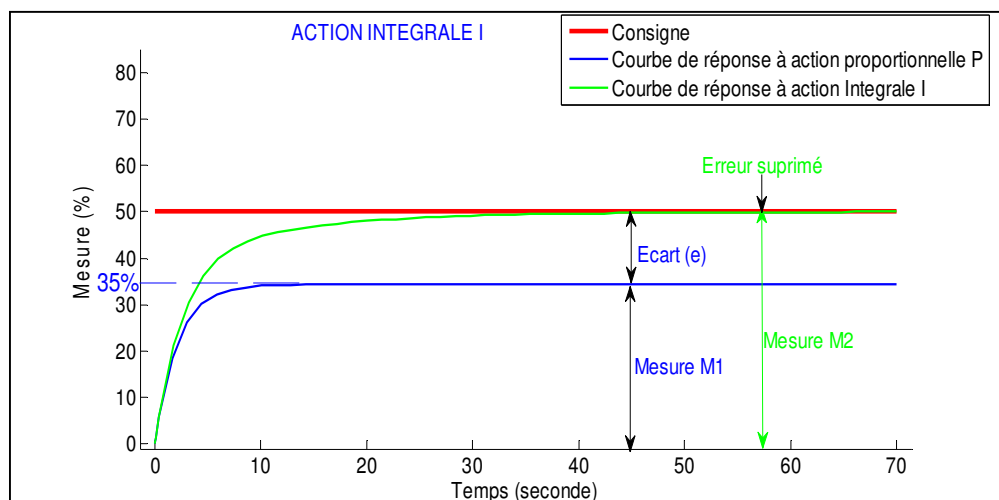


Figure 8 : Courbe de réponse à action intégrale (K_i petit)

❑ Interprétation

Cette figure montre que si on ajoute le terme intégral I ($K_i=0.1$) courbe verte, l'écart est supprimé mais en terme rapidité, le système est encore lent.

Donc, pour l'accélérer, on augmente le gain $K_i=1$ et on configure le régulateur par les paramètres suivants :

$C = 50\%$, $K_p=1$, $K_i=0.1$ et $K_i=1$, $K_d=0$

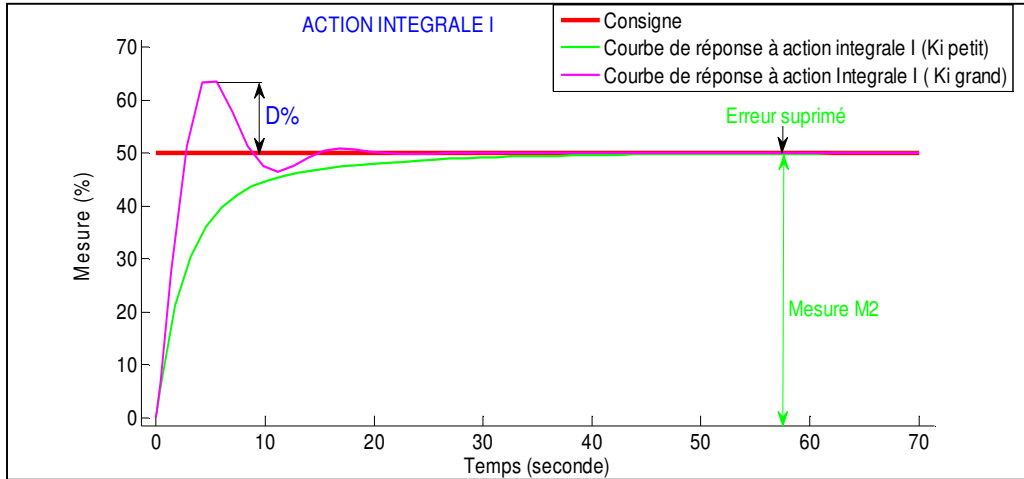


Figure 9 : Courbe de réponse à action intégrale (K_i grand)

❑ Interprétation

Si on augmente le gain $K_i=1$ (courbe rose), il y a un dépassement $D\%$ qui entraine une déstabilisation du système.

Pour diminuer ce dépassement $D\%$, on ajoute le terme dérivé.

❑ Effet d'un régulateur PID

On introduit l'action dérivé et on configure le régulateur par :

Consigne =50%, $K_p= 1$, $K_i= 0.1$ et $K_i=1$, $K_d=2$

Alors, la courbe de réponse est :

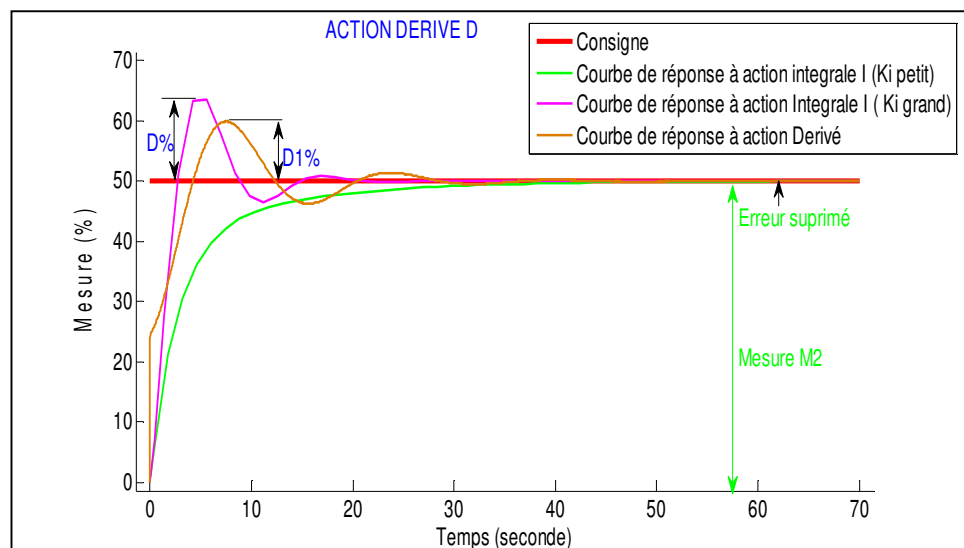


Figure 10 : Courbe de réponse du système à action dérivé D

Consigne =50%, $K_p=1$, $K_i=0.1$ et $K_i=1$, $K_d=2$ et $K_d=5$

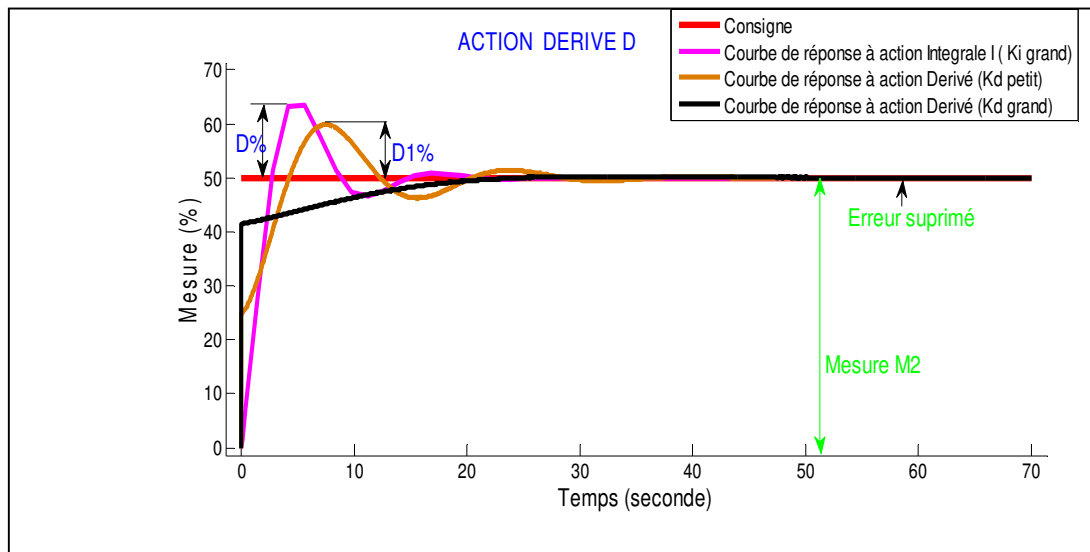


Figure 11 : Courbe de réponse du système à action dérivée

❑ **Interprétation :**

Si on ajoute le terme dérivé $K_d=2$ (courbe marron), on constate que le dépassement $D\%$ diminue et le système devient stable. Si on augmente le gain dérivé par $K_d=5$, le dépassement diminue de plus en plus et enfin il n'y a aucun dépassement (courbe noire). Le système devient plus rapide.

Tableau 02 : Récapitulation de courbe de réponse

Consigne	K_p	K_i	K_d	Mesure	Ecart
50%	1	0	0	35%	15%
50%	1	0.1	0	50%	$\approx 0\%$
50%	1	1	0	50%	$\approx 0\%$
50%	1	1	2	50%	$\approx 0\%$
50%	1	0.1	5	50%	$\approx 0\%$

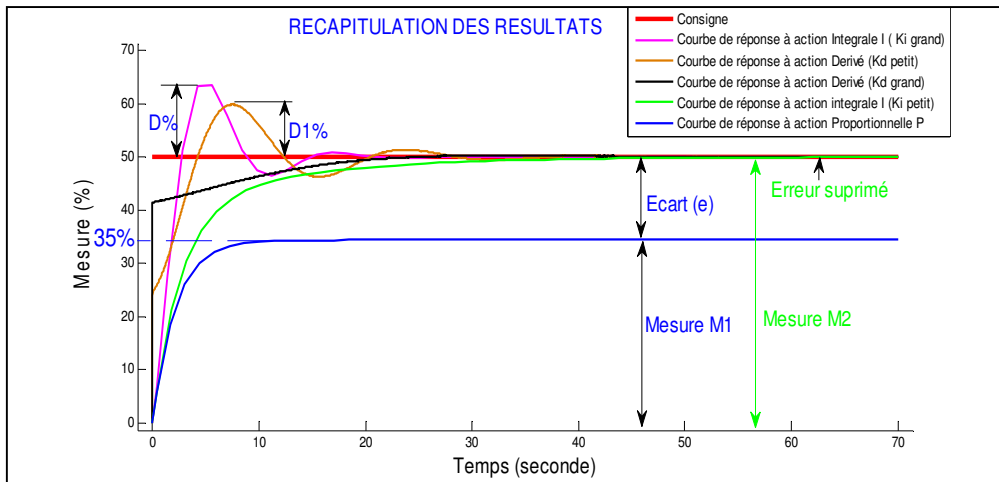


Figure 12 : Récapitulation des résultats

❑ Réglage de l'optimisation du système

Consigne =50%, $K_p=1$, $K_i=0.1$, $K_d=5$

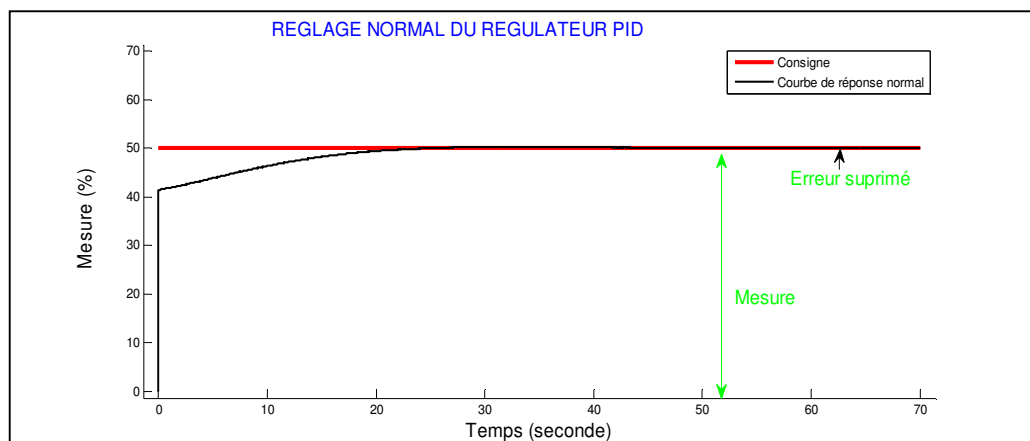


Figure 13 : Réglage de l'optimisation du système

❑ Analyse des résultats

❖ Analyse sur l'étude temporelle:

- Précision
- Rapidité
- Stabilité

❖ Analyse du PID

- Résumé de l'analyse du PID [8,31, 50]

L'action proportionnelle :

- Permet de corriger les effets d'une perturbation,
- Déstabilise le système quand on augmente le gain,
- Mais elle n'annule pas l'erreur.

L'action intégrale :

- Corrige les effets d'une perturbation,
- Annule l'erreur statique,
- Introduit un dépassement,
- Mais elle n'est pas très rapide.

L'action dérivée :

- Accélère la correction,
- Réduire le dépassement,
- Stabilise plus rapidement le système,
- Mais n'annule pas l'erreur statique.

L'effet du correcteur PID est résumé dans le tableau suivant [31] :

Tableau 03 : Récapitulation de l'analyse des résultats

Régulateur	Temps de montée	D% : dépassement	Temps de stabilisation	ϵ : Erreur
Kp	Diminue	Augmente	Augmente	Diminue
Ki	Diminue	Augmente	Augmente	Annule
Kd		Diminue	Diminue	-

5. CONCLUSION

Pour conclure, l'étude de l'optimisation de la gestion de la maintenance de tracteurs dans un parc de matériels est un levier de développement à Madagascar dans le domaine de la motorisation agricole afin d'atteindre à l'autonomie entière de maintenance face à son économie très morose qui prévaut actuellement. Elle dégage des informations, connaissances et savoirs très intéressants et enrichissantes en matière de maintenance de tracteurs. Plusieurs systèmes de modélisation de lubrification peuvent être exécutés afin d'évaluer ou dégager les indices qui puissent restituer l'état de dégradation d'huile dans le carter. Nos résultats sont concluants. On peut alors confirmer que l'hypothèse de recherche est bien vérifiée. Après des essais on a constaté qu'il y a encore des améliorations à faire. Il s'agit de combiner le séparateur centrifuge et le recycleur avec du coalesceur afin combler le vide sur le séparateur centrifuge, c'est-à-dire rattraper le défaut.

REFERENCES

- [1] Michael TRAUTWEIN, Gerd Hilgers, Franz HUNDS, Bruno STEGEMANN, G. STEGEMANN, Ingenieur-gruppeTrieboteknikWiefelstede, Mannesmann REXROTH, Harry DAUTZENBERG, Gregor KRAUSE, Anneliese BOPY, Joachim FRENZEL-PAUL, *Gestion de la maintenance*, CDG Carl DuisbergGesellschaft), Aachen- Köhl-Berlin,1988-2000.
- [2] De Conto Jean –Marie, *Mesures physiques*, Edition UIT Grenoble Mai 2011.
- [3] Florent P., Lauton G., Lauton M., *Equations et systèmes différentiels, Tome IV*, Edition France 1978.
- [4] ALLARD M., *Equations différentielles*, LIDEC. Edition France. 2014
- [5] DixmierJ.,Gauthier VILLARD, *Cours de mathématiques de premier cycle*. Edition France 1998
- [6] PISKOUNOV N., *Calcul différentiel et intégral*. Edition MIR 1974
- [7] Hacques G., Armand COLIN, *Algorithme numérique*. Edition France 1971, 2017
- [8] *Modélisation mathématique et numérique des fluides à l'échelle nanométrique*, Rémi JOUBAUD. Université Paris-Est 2012.

- [9] File://H:/Maintenance_preventive-Wikipédia.htm: consulté le 29/08/2015, Norme NF 13306 X 60-319 du 06/2001, Olivier GAUDOIN/ FIMA/Terminologie Maintenance, 24 Mai 2015.
- [10] File://H:/Maintenance_preventive-Wikipédia.htm: consulté le 29/08/2015, Norme NF 13306 X 60-319 du 06/2001, Olivier GAUDOIN/ FIMA/Terminologie Maintenance, 24 Mai 2015.
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Huile_moteur: consulté le 16 Février 2019, WIKIMEDIA FONDATION, Inc. 10 Novembre 2018
- [12] *Motor_oil_SAE_40.pdf* : consulté le 2018, TOTAL LUBRIFIANTS, mise à jour 03/2008
- [13] Castrol, *ABC du graissage, Structure, Utilisation et Propriétés des lubrifiants*. HC 04(2003)
- [14] K. Malal, Thèse de doctorat, *Contribution à l'étude de l'influence de la rigidité et des effets non newtoniens dans les contacts severs lubrifiés*, Institut national des Sciences Appliquées de Lyon (2003)
- [15] <https://www.iespm.fr/analyse-huile-moteur/> : consulté le 22 Février 2018, IESPM Group 2017.
- [16] J. Weismann. *Carburants et combustibles pour moteurs à combustion interne*. Edition Technip. (1970) 557-579
- [17] Mark A. Nicholls, Than Do, Peter R. Norton, MasoudKasrai, G. Michaël Bancroft, Review of *lubrification of metallic surfaces by zinc dialkyl-dithiophosphates*. Elsevier. Tribology international 38 (2005) 15-39
- [18] MridulGautan, KarthikChitoor, MuraliDurbha, Jerry C. Summers. *Effect of diesel soot contaminated oil on engine wear-investigation of novel formulation*. Elsevier. Tribology International 32 (1999) 687-699
- [19] John J. Truhan, Jun Qub, Peter...Blau. *The effect of lubricating oil condition on the friction and wear of piston rint and cylinder liner materiels in a reciprocating bench test*. Elsevier. Wear 259 (2005) 1048-1055.
- [20] M. Chabanel, P. Gressier. *Liaison chimique et spectroscopie*. Ellipse (1991).
- [21] Benzing R, Goldblatt I, Hopkins V, Jamison W, Mecklenburg K, Peterson M. *Friction and wear devices*. American Society of Lubrication Engineers (1976)
- [22] S. Tsiareshka. Master of Science in *Mechanical Engineering*. Georgia Institut of Technology (2006)
- [23] P. Vahaoja. *Oil analysis in machine diagnostics*. ACTA UniversitatisOuluensis. A. Scientiae RerumNaturalium 458 (2006).
- [24] James W. Ball, D. Kirk Nordstrom, Everett A. Jenne, Davison V. Vivit. *Chemical analysis of hot springs, pools geysers, and surface waters from yellowstone national park, wyoming and vicinity*. Science for a changing world (1998).
- [25] *Joint oil analysis program manual (Volume I)*. 0817LP1046015. Direction of Commander, Naval Air Systems Command (2005).
- [26] *Motor_oil_SAE_20W_40.pdf* :consulté le 2018, Delo 71O LE SAE 20W-40, 26 Août 2015.
- [27] https://fr.wikipedia.org/wiki/Huile_moteur, consulté le 16 Février 2019, WIKIMEDIA Fondation, Inc. 10 Novembre 2018
- [28] https://fr.wikipedia.org/wiki/Huile_de_synthese_moteur: consulté le 30 Mars 2020, Wikimedia Fondation, Inc. 23 Février 2018
- [29] <https://www.lubricants.total.com>: consulté le 11 Juillet 2019, TOTAL LUBRIFIANTS, mis à jour 08/2014
- [30] *Modélisation du réseau de distribution d'eau potable de la zone ouest de la ville d'ANTANANARIVO à partir du surpresseur d'Ambodimita,Zafiarijatovo* RAKOTOARISOA, 02 Août 2006.
- [31] *Apport de la modélisation et de la simulation à l'analyse des risques et la prévention des accidents d'un site de stockage de GPL (Gaz, Pétrole Liquéfié)*, Dahlia OUEIDAT, 13 Décembre 2016.
- [32] *Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques : Modélisation par le logiciel WEAP-21, cas du bassin versant de Morondava (Sud-ouest de Madagascar)*, Felaniaina RAKOTONDRABE, 27 Septembre 2007.
- [34] Florent P., Lauton G., Lauton M., *Equations et systèmes différentiels, Tome IV*, Edition France 1978.
- [35] ALLARD M., *Equations différentielles*, LIDEC Edition France 1962, 2014
- [36] DIXMIER J.,Gauthier VILLARD,*Cours de mathématiques du premier cycle* , Edition France 1998
- [37] PISKOUNOV N., *Calcul différentiel et intégral*, Edition MIR1974
- [38] HACQUES G., Armand COLIN, *Algorithme numérique*, Edition France 1971, 2017
- [39] Gérard COLOMBARI et Jacques GIRAUD, *Sciences industrielles pour l'ingénieur , 1^{er} Année*, Edition France 2005
- [40] *Modélisation mathématique et numérique des fluides à l'échelle nanométrique*, Rémi JOUBAUD. Université Paris-Est 2012.

- [41] [http:// www.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours_TD../cours_asservissement.pdf](http://www.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours_TD../cours_asservissement.pdf): /consulté le 08 Décembre 2018
- [42] [http:// www.academia.edu/30496344/Polycopie_D_Rached](http://www.academia.edu/30496344/Polycopie_D_Rached): consulté le 24 Janvier 2018
- [43] http://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/Polycopie_D_Rached:consulté le 24 Janvier 2018
- [44] [http:// www.technologuepro.com/cours.../chapitre-5-systeme-de-premier-ordre](http://www.technologuepro.com/cours.../chapitre-5-systeme-de-premier-ordre): consulté le 24 Janvier 2018
- [45] [http:// www.hec.ca/cam/rubriques/modelisation](http://www.hec.ca/cam/rubriques/modelisation): consulté le 24 Janvier 2018
- [46] [http:// www.cpht.polytechnique.fr/.../livre.pdf](http://www.cpht.polytechnique.fr/.../livre.pdf): consulté le 24 Janvier 2018
- [47] [http:// www.mathworks.com/discovery/modelin...:](http://www.mathworks.com/discovery/modelin...) consulté le 24 Janvier 2018
- [48] [http:// www.mathworks.com/matlabcentral/ans](http://www.mathworks.com/matlabcentral/ans): consulté le 26 Mars 2018
- [49] [http:// www.technologuepro.com/tp-asservissement](http://www.technologuepro.com/tp-asservissement). consulté le 26 Mars 2018
- [50] [http:// www.bh-automation.fr/download/Autom](http://www.bh-automation.fr/download/Autom): consulté le 26 Mars 2018