

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministere de l'enseignement Superieur et de la Recherche Scientifique



Université M'Hamed Bougara
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Génie mécanique

Option : Mécanique des chantiers pétroliers

Présenté par : ***KHELOUFI Kheridine***

et

GHACHI Sami Riadh

Contrôle de l'état d'un équipement par l'intelligence artificielle. Application à la Butée d'un Top Drive

Devant le jury :

MOHAMMEDI Kamal	Prof	UMBB	Président
BLOUL Ben attia	MCA	UMBB	Examineur
HARHOUT Riadh	MAA	UMBB	Examineur
HALIMI Djamal	MCB	UMBB	Encadreur

Boumerdes : 2021



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, à mon père qu'est veillé pour mon graduation jusqu'à ce moment ; Mes chers frères, ma sœur et toute ma famille.

A tous ceux qui m'ont soutenu dans ma vie, mes chers amis et surtout mon binôme Sami, pour sa patience et motivation, Didine et Ikbal pour leur soutien et leurs orientations précieuses, la famille de MACP16.

Et enfin à tous ceux qui m'ont aidé de près ou loin.

Kheridine Kheloufi

Je dédie cet ouvrage

A mes parents qui m'ont soutenu et encouragés durant ces années d'études, à mes deux frères Housseem et Chihab, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A celui qui à partager avec moi tous les moments d'émotion lors de mon parcours universitaire... merci Chikho.

A notre futé Didine qui m'a beaucoup soutenu... merci infiniment pour ton aide précieuse.

A mon binôme Kheridine qui a partagé avec moi mes soucis et mes moments de joie

A mes amis : Ikbal, Aymen, Azzou, Selmane, Oussama, Riyadh, Bachir, Zaki et Nacer.

Ghachi Sami Riad





Remerciement

*Gloire à dieu qui a créé, dirigé notre parcours et aidé, pour cela nous disons
ELHAMDOULILLAH.*

*Nous remercions nos chers parents pour leurs sacrifices, leurs aides morales
et matérielles.*

*Nous tenon à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs qui nous
ont aidés tout au long de notre cursus universitaire en particulier notre
encadreur **Mr. Halimi**, il nous a aidé tout le long de la réalisation de notre
mémoire, nous saluons en lui sa patience, ses précieux conseils, ses
encouragements et surtout son savoir et savoir-faire.*

*Nous adressons nos remerciements à **Mr. Chir** pour son aide et soutien.*

*Nous tenons à remercier tous enseignants de département de transport et
équipements des hydrocarbures pour leurs connaissances et savoir partagés
avec nous durant tout notre cursus.*

*Et enfin notre gratitude à toute personne qui a contribué de près ou de loin
dans la réalisation de ce travail.*



Résumé

Le forage est un processus très compliqué et onéreux, qui nécessite des équipements très performants pouvant travailler dans des conditions extrêmes, qui provoquent la détérioration et l'usure rapide.

La maintenance préventive et corrective assure la surveillance de ces équipements pour limiter les arrêtes et donc augmenter la productivité et la fiabilité. Mais à cause du non-respect des instructions de la maintenance ou des mauvaises manipulations, la défaillance survient, tandis que le coût d'arrête est très élevé. Alors, il faut créer une nouvelle stratégie de maintenance, pour un diagnostic bien précis.

Ce mémoire explore l'utilisation d'intelligence artificielle dans la maintenance prédictive, au sein des chantiers pétroliers, ce dernier utilise des données des capteurs pour l'autodiagnostic de l'état des équipements critiques, Afin d'éliminer les erreurs humaines, et donc réduire le coût d'arrête.

Mots clés : la maintenance, la maintenance prédictive, le coût d'arrête, intelligence artificielle.

ملخص

الحفر هو عملية جد معقدة و مكلفة، تحتاج الى معدات جد فعالة تستطيع ان تعمل في شروط صعبة تسبب التدهور والتآكل السريع.

الصيانة الوقائية و التصحيحية تضمن مراقبة هذه المعدات، للحد من وقت التوقف عن العمل وبالتالي زيادة الإنتاجية و الموثوقية. و لكن بسبب عدم احترام تعليمات الصيانة و المناورات السيئة يحدث العطل، حيث أن تكلفة التوقف عن العمل مرتفعة للغاية. لذلك يتعين علينا إنشاء استراتيجية جديدة للصيانة، من أجل تشخيص أكثر دقة.

تستكشف هذه الأطروحة استعمال الذكاء الاصطناعي في الصيانة التنبؤية داخل الورشات البترولية ، الذي يستعمل بيانات الاستشعار من أجل التشخيص الاوتوماتيكي لحالة المعدات الحرجة، من أجل القضاء على الأخطاء البشرية، وبالتالي تقليل تكلفة التوقف عن العمل.

الكلمات المفتاحية: الصيانة، الصيانة التنبؤية، تكلفة التوقف عن العمل، الذكاء الاصطناعي

Abstract

Drilling is a very complicated and expensive process, which requires high performances equipments that can work in extreme conditions, causing deterioration and rapid wear.

Preventive and corrective maintenance ensures the monitoring of this equipment to limit downtime and thus increase productivity and reliability. However, due to non-compliance with maintenance instructions or poor handling, failure has occurred, while the cost of downtime is very high. Therefore, a new maintenance strategy must be created, for a diagnosis that is more precise.

This thesis explores the use of artificial intelligence in predictive maintenance, within oilfields using sensor data to automatically diagnose the condition of critical equipment, in order to eliminate human error, and thus reduce the cost of downtime.

Keywords: maintenance, predictive maintenance, the cost of downtime, artificial intelligence

Table des matières

DEDECASES	
Remerciement	
Résumé	
Table des matières	
Acronymes	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1

Chapitre I : La description du chantier pétrolier

I.1 L'industrie pétrolière.....	3
I.1.1 Le forage.....	3
I.1.1.1 Le forage rotary.....	4
I.1.2. La classification et le choix d'un appareil de forage.....	4
I.1.3. La description d'un appareil de forage.....	5
I.2 Les Equipements du chantier pétrolier	6
I.2.1. Les équipements de fond.....	6
I.2.1.1. La garniture de forage (Drill stem or Drill string)	6
I.2.1.2. Les outils de forage	8
I.2.1.3. Les tubages (Casing)	9
I.2.1.4. Les accessoires de la garniture.....	9
I.2.2. Les Equipements de surface	10
I.2.2.1. Equipements de levage.....	10
I.2.2.2. Equipements de pompage et de circulation	13
I.2.2.3. Equipements de sécurité et de contrôle de venues	15
I.2.2.4. Equipements de puissance	16
I.2.2.5. Equipements de rotation.....	17

Chapitre II : Classification et caractéristiques des Top Drives

II.1. Types et classification des Top Drives	20
II.1.1. Top Drive GDS.....	20
II.1.2. Top Drive TESCO.....	21
II.1.2.1. TESCO électrique Top Drive.....	22
II.1.2.2. TESCO hydraulique Top Drive.....	23

II.1.3. Top Drive VARCO.....	26
II.1.3.1. Du 150 jusqu' à 350-ton Electric Top Drive.....	26
II.1.3.2. Top Drive 500 Ton Electric	27
II.1.3.3. Top Drive 750 à 1,000 Ton Electric	28
II.1.3.4. Top Drive 1,000 à 1,500 Ton	30
II.1.4. Top Drive BENTEC.....	32
II.1.4.1. Top Drive BENTEC TD-250 C.....	32
II.1.4.2. Top Drive BENTEC TD-275-HT.....	32
II.1.4.3. Top Drive BENTEC TD-350-HT.....	33
II.1.4.4. Top Drive BENTEC TD-500-HT.....	34
II.1.4.5. Top Drive BENTEC TD-750-HT.....	34

Chapitre III : Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

III.1. Spécifications (modèle 1050E-500).....	36
III.1.1. Désignation du modèle.....	36
III.1.2. Caractéristiques.....	36
III.1.3. Composition du top drive.....	37
III.1.4. Partie mécanique.....	37
III.1.4.1. Unité de forage.....	37
III.1.4.2. Unité de manipulation des tiges	42
III.1.4.3. Unité de suspension.....	46
III.2. Maintenance du CANRIG 1050E-500.....	47
III.2.1. Tâches de maintenance appliquées au TD 1050E-500.....	47
III.2.1.1. Graissage	47
III.2.1.2. Inspection chaque 700 heures.....	48
III.2.1.3. Inspection chaque 4000 heures	48
III.2.1.4. Inspection interne.....	49
III.2.1.5. Inspection suivant chaque déplacement de l'unité de forage.....	49
III.2.1.6. Inspection suivant des périodes de forage sévères.....	49
III.2.1.7. Inspection du tube d'usure.....	50
III.2.1.8. Tolérances recommandées.....	50
III.2.1.9. Inspection du frein à disque	51
III.2.2. Description de la butée.....	53
III.2.2.1. Utilisation dans le domaine de forage des puits.....	53
III.3. Problématique.....	54
III.3.1. Etude de la butée.....	54
III.3.2. Calcul de la butée	55

III.3.2.1. Dimensions de la butée.....	55
III.3.2.2. Dimensions de l'élément roulant	55
III.3.2.3. Masse de l'élément roulant.....	56
III.3.2.4. Masse des bagues et de la cage.....	56
III.3.2.5. Charge appliquée sur la butée.....	56
III.3.3. Simulation de la butée.....	57
III.3.3.1. Schéma de blocs.....	58
III.3.3.2. Schéma de simulation sur Simulink.....	58
III.3.3.3. Calcul des coefficients de rigidité et d'amortissement.....	60
III.3.3.4. Rigidité de l'élément roulant	60
III.3.3.5. Rigidité des anneaux.....	63
III.3.3.6. Rigidité du contact Hertzien	63
III.3.3.7. Rigidité du lubrifiant	64
III.3.3.8. Amortissement du rouleau.....	64
III.3.3.9. Amortissement du contact Hertzien.....	65
III.3.3.10. Amortissement de l'anneau.....	65
III.3.3.11. Amortissement du film lubrifiant.....	65
III.3.3.12. Résultats des calculs	66
III.3.3.13. Butée non défaillante sans lubrification	67
III.3.3.14. Butée non défaillante avec lubrification	69
III.3.3.15. Butée avec lubrification et un défaut dans la cage.....	69
III.3.3.16. Butée avec lubrification et un défaut dans l'un des anneaux	70
III.3.3.17. Butée avec lubrification et un défaut dans le rouleau	71
III.3.4. Calcule des fréquences.....	72
III.3.5. Lancement de la simulation.....	75
III.3.6. Résultats des simulations et interprétation	76
III.3.6.1. Butée non défaillante avec lubrification	76
III.3.6.2. Butée non défaillante sans lubrification	77
III.3.6.3. Butée avec lubrification et un défaut dans la cage	78
III.3.6.4. Butée avec lubrification et un défaut dans l'anneau.....	79
III.3.6.5. Butée avec lubrification et un défaut dans le rouleau.....	81
III.3.6.6. Butée avec lubrification et un défaut dans la cage et l'anneau.....	83
III.3.6.7. Butée avec lubrification et un défaut dans la cage et le rouleau.....	84
III.3.6.8. Butée lubrifiée avec défaut dans l'anneau et le rouleau.....	85
III.3.6.9. Butée lubrifiée avec défaut dans la cage, l'anneau et le rouleau.....	86

Chapitre VI : Surveillance automatique d'état de la butée BFS-8033 par l'IA

IV.1 L'Apprentissage Automatique (Machine Learning)	88
IV.1.1. Les Algorithmes d'apprentissage de ML	89
IV.1.1.1. Support Vector Machine (SVM).....	89
IV.1.1.2. Arbre de décision (Decision Tree).....	90
IV.1.1.3. XG Boost Classificateur	91
IV.1.1.4. K- Nearest Neighbors (KNN).....	91
IV.1.1.5. La régression.....	92
IV.1.2. Le Sur-apprentissage (Overfitting)	92
IV.2. L'apprentissage profond (Deep Learning)	93
IV.2.1. Pourquoi le Deep Learning ?	93
IV.2.2. La structure et le fonctionnement du ANN	94
IV.2.2.1. Les principales composantes du réseau de neurones.....	94
IV.2.3. Types et architectures des réseaux de neurones artificiels	98
IV.2.3.1. Perceptron monocouche (un seul neurone).....	98
IV.2.3.2. Multi Layer Perceptron (MLP).....	99
IV.2.3.3. Réseau de neurones récurrent (Recurrent Neural Network)	99
IV.2.3.4. Réseau de neurones de convolution (Convolution Neural Network)	100
IV.2.4. Apprentissage des réseaux des neurones artificiels	101
IV.2.4.1. La Fonction de Coût (Loss Function)	101
IV.2.5. La Classification par le réseau des neurones	103
IV.3. La surveillance automatique de l'état de butée BFS-8033 par les modèles d'intelligence artificiel (IA)	103
IV.3.1. Prétraitement des données (preprocessing of datas)	103
IV.3.1.1. Importation et préparation des données	103
IV.3.2. La Construction des modèles d'intelligence artificielle (AI)	109
IV.3.2.1. Le réseau des neurones : Multi Layer Perceptron (MLP)	109
IV.3.2.2 Les algorithmes de Machine Learning	111
IV.4. Implémentation du modèle d'IA dans le système de surveillance de TD	114
Conclusion générale	115
Bibliographies	

Table des figures

I.1	Description simplifiée d'un Appareil de forage [6].....	5
I.2	Stabilisateur ; Tiges de forage ; Masses tiges [4]	7
I.3	Les outils diamant ; les outils à molettes [4].....	8
I.4	Les tubages ; Le centreur [4].....	9
I.5	Le système de mouflage [8].....	11
I.6	Le Treuil (Draw Work) [15].....	11
I.7	Moufle mobile et crochet ; Moufle fixe ; Le réa [4].....	12
I.8	Schéma d'une pompe à boue triplex simple effet [9].....	13
I.9	Système de circulation de boue de forage [4].....	14
I.10	BOP annulaire [13] ; BOP à mâchoires [9].....	15
I.11	L'unité d'accumulation de pression (kommey) ; le choc manifold (ENF45)	16
I.12	Moteur Diesel Caterpillar [12].....	16
I.13	Table de rotation BENTEC RDF-375-490-VAR-350-37,3 [14].....	17
I.14	Equipements de rotation [4].....	18
I.15	Top Drive System TD-500-XT [12].....	18
II.1	Série Top drive GDS [15].....	21
II.2	Le couple continue en fonction de la vitesse de rotation de la série GDS [15].....	21
II.3	TESCO 250 EMI 400 et 350 EXI 600 [16].....	22
II.4	TESCO 500/650 ECI et 700 ECIX 1350 [16].....	23
II.5	TESCO 250 HMIS 475 et 250 HXI 700 [16].....	24
II.6	TESCO 500/600 HS et 500/600 HCI [16].....	24
II.7	Top Drive ESI 1000 [17].....	25
II.8	TDS-10SH et IDS-350 PE [18].....	27
II.9	TDS-11SA, TDS-11SH et TDS-11HD [18].....	28
II.10	TDS-1000, TDS-8S et TDS-4S [18].....	30

II.11	TDX-1500, TDX-1250 et TDX-1000 [18].....	31
II.12	TD-250 C [19].....	32
II.13	TD-275-HT [19].....	32
II.14	Le couple en fonction de la vitesse de rotation de TD-250C et TD-275HT [19].....	33
II.15	TD-350-HT [19].....	33
II.16	Le couple en fonction de la vitesse de rotation du TD-350-HT [19].....	33
II.17	TD-500-HT [19].....	34
II.18	Le couple en fonction de la vitesse de rotation de TD-500-HT [19].....	34
II.19	TD-750-HT [19].....	32
II.20	Le couple en fonction de la vitesse de rotation de TD-750-HT [19].....	35
III.1	Schémas 1 du TD CANRIG [20].....	37
III.2	Le Bonnet [20].....	38
III.3	Le Washpipe.....	38
III.4	Le Goosneck [24].....	39
III.5	Moteur d'entraînement et pignon moteur [20].....	39
III.6	Gear bull hub [20].....	40
III.7	Gear case [24].....	40
III.8	Spindle [20].....	40
III.9	Quill [20].....	41
III.10	Main housing [20].....	41
III.11	Gear idler.....	41
III.12	Female Drive Spline [20].....	41
III.13	Torque boost [24].....	41
III.14	Assemblage freins [22].....	42
III.15	Le Rotary Manifold [20].....	42
III.16	Inner and Outer Sleeve [20].....	43
III.17	Inner Race [20].....	43

III.18	Schémas 2 du TD CANRIG [20].....	43
III.19	Link Support [21].....	44
III.20	Link Support avec Gripper [26].....	44
III.21	Back-up Wrench [21].....	45
III.22	Ensemble Back-up Wrench et le Rotary Manifold [21].....	45
III.23	Actuator [23].....	46
III.24	Assemblage de suspension [24].....	46
III.25	Assemblage de suspension 2 [20].....	47
III.26	Inspection du tube d'usure [20].....	50
III.27	Schéma du circuit de lubrification [20].....	52
III.28	Butée BFS-8033 [28].....	53
III.29	Butée dans le main housing.....	53
III.30	Butée complètement défailante [27].....	54
III.31	Dimensions de la BFS-8033 [28].....	55
III.32	Dimension du rouleau conique.....	56
III.33	Bibliothèque Simscape.....	57
III.34	Simplification du système [29].....	58
III.35	Schéma de blocs général.....	59
III.36	L'élément roulant après discrétisation.....	61
III.37	Script de la matrice de rigidité.....	62
III.38	Résultat du script.....	62
III.39	Programme de calcul.....	66
III.40	Résultats calculés.....	66
III.41	Implémentation des résultats.....	67
III.42	Schéma de blocs pour une butée non défailante et sans lubrification.....	68
III.43	Schéma blocs d'une butée lubrifiée avec un défaut dans la cage.....	69
III.44	Schéma blocs d'une butée lubrifiée avec un défaut dans l'anneau.....	70

III.45	Schéma blocs d'une butée lubrifiée avec un défaut dans le rouleau.....	71
III.46	Equations des fréquences de roulement [30].....	72
III.47	Boite de dialogue du bloc source de vibration.....	74
III.48	Capteur de mouvement utilisé.....	75
III.49	Choix recommandés pour étude de vibration [36].....	76
III.50	Graphe pour une butée non défaillante avec lubrification pour 260 tour/min.....	76
III.51	Graphe pour une butée non défaillante avec lubrification pour 500 tour/min.....	77
III.52	Graphe pour une butée non défaillante sans lubrification pour 260 tour/min.....	77
III.53	Graphe pour une butée non défaillante sans lubrification pour 500 tour/min.....	78
III.54	Butée avec lubrification et un défaut dans la cage pour 260 tour/min.....	78
III.55	Butée avec lubrification et un défaut dans la cage pour 500 tour/min.....	79
III.56	Butée avec lubrification et un défaut dans l'anneau pour 260 tour/min.....	79
III.57	Butée avec lubrification et un défaut dans l'anneau pour 500 tour/min.....	80
III.58	Comparaison entre les graphes du cas de défaut dans l'anneau.....	80
III.59	Butée avec lubrification et un défaut dans le rouleau pour 260 tour/min.....	81
III.60	Butée avec lubrification et un défaut dans le rouleau pour 500 tour/min.....	81
III.61	Comparaison entre les graphes du cas de défaut dans le rouleau.....	82
III.62	Butée avec lubrification et un défaut de cage et anneau pour 260 tour/min.....	83
III.63	Butée avec lubrification et un défaut de cage et anneau pour 500 tour/min.....	83
III.64	Butée avec lubrification et un défaut de cage et rouleau pour 260 tour/min.....	84
III.65	Butée avec lubrification et un défaut de cage et rouleau pour 500 tour/min.....	84
III.66	Butée lubrifiée avec un défaut d'anneau et de rouleau pour 260 tour/min.....	85
III.67	Butée lubrifiée avec un défaut d'anneau et de rouleau pour 500 tour/min.....	85
III.68	Butée avec un défaut dans la cage, l'anneau et le rouleau pour 260 tour/min.....	86
III.69	Butée avec un défaut dans la cage, l'anneau et le rouleau pour 500 tour/min.....	86
IV.1	Optimale Hyperplan Support Vector Machine [52].....	89
IV.2	SVM : Illustration de la transformation de l'espace initial [52].....	90

IV.3	Exemple d'arbre de classification [43].....	90
IV.4	Algorithme de KNN [53].....	91
IV.5	La Fonction logistique sigmoïde [53].....	92
IV.6	Performance de ML et DL par rapport la quantité des données [50].....	94
IV.7	Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel [40].....	95
IV.8	Structure d'un neurone artificiel [51].....	95
IV.9	Le Perceptron : structure et comportement [42].....	98
IV.10	MLP architecture avec deux couches cachées et une sortie [42].....	99
IV.11	Architecture simplifié d'un réseau RNN [41].....	100
IV.12	Architecture de CNN avec des couches convolution et pooling [47].....	100
IV.13	Les positions des minimas et des maximas Globaux et Locaux [42].....	103
IV.14	Importation des données.....	104
IV.15	Description des échantillons – exemple du premier échantillon.....	105
IV.16	Le boxplot des tous les vibrations du butée BFS-8033.....	105
IV.17	Heat-mab corrélation des paramètres avant (gauche) et après (droite) la standardisation.....	106
IV.18	boxplot des paramètres avant (gauche) et après (droite) la standardisation.....	107
IV.19	Le subplots du trois cas déférentes après la standardisation des données.....	108
IV.20	La fonction de coût par époques au training et test.....	110
IV.21	La précision de diagnostic des algorithmes de ML.....	111
IV.22	La matrice de confusion de modèle RF.....	112
IV.23	Comparaison entre les valeurs réelles et prédites par le RF.....	112
IV.24	La matrice de confusion de modèle XGB.....	113
IV.25	Comparaison entre les valeurs réelles et prédites par le XG Boost.....	114

Liste des tableaux

I.1	Classification des appareils de forage selon la puissance de levage [3].....	4
II.1	Classification des Top drives GDS [15].....	20
II.2	Types et modèles de la série TESCO [16].....	21
II.3	Caractéristiques des TDs TESCO électriques [16].....	22
II.4	Caractéristiques des TDs TESCO hydrauliques [16].....	23
II.5	Caractéristiques du TDS-10SH et IDS-350 PE [18].....	26
II.6	Caractéristiques du TDS-11SA, TDS-11SH et TDS-11HD [18].....	27
II.7	Caractéristiques du TDS-1000, TDS-8S et TDS-4S [18].....	29
II.8	Caractéristiques du TDX-150, TDX-1250 et TDX-1000 [18].....	30
II.9	TD-250 C [19].....	32
II.10	TD-275HT [19].....	32
II.11	TD-350-HT [19].....	33
II.12	TD-500-HT [19].....	34
II.13	TD-750-HT [19].....	34
III.1	Les caractéristiques du Top Drive CANRIG 1050E-500 [20].....	36
III.2	Plans de maintenance systématique de l'ENTP du 1050E-500 [25].....	47
IV.1	Les fonctions d'activation du ANN.....	97
IV.2	Affichage quelques lignes et colonnes des données.....	104
IV.3	Les deux architectures utilisées du modèle neuronale MLP.....	109
IV.4	Indicateurs supplémentaires sur la performance du modèle RF.....	112
IV.5	Indicateurs supplémentaires sur la performance du modèle XGB.....	113

Acronymes

AdF Appareil de forage.

ANN Artificiel Neural Network.

API American Petroleum Institute.

BOP Blow Out Preventer.

CAO Conception Assistée par Ordinateur

CNN Convolution Neural Network.

DG Descent Gradient.

DL Deep Learning.

IA Intelligence Artificiel.

KNN K - Nearest Neighbors.

ML Machine Learning.

MLP Multi Layer Perceptron.

MSE Mean Square Error.

MWD/LWD Measurement-while-drilling/ Logging-while- drilling.

PDC Polycrystalline de diamant compact.

RF Random Forest.

RNN Recurrent Neural Network.

SGD Stochastic Gradient Descent.

SVM Support Vector Machine.

TD Top Drive.

WOB Weight on bit

XGB eXtreme Gradient Boosting.

Introduction générale

Les hydrocarbures possèdent une importance primordiale dans l'industrie et dans l'économie mondiale par sa valeur ajoutée. L'exploitation des puits pétroliers par le forage est une opération très coûteuse due aux variétés des équipements utilisés, et complexités soit à la fabrication ou à l'utilisation ou même aussi à sa maintenance ; la rationalisation de cette dernière contribue à la stabilisation à un niveau acceptable du coût de défaillance qui est souvent assez très élevés.

Le forage nécessite des outils performants, qui ont besoin de la surveillance pour les maintenir en bon état. La maintenance joue un rôle essentiel pour préserver l'état de bon fonctionnement des biens, notamment qu'ils travaillent dans des conditions extrêmes, et donc possèdent plus de tendance d'être défaillants. La perte de la fonction requise d'une machine est une propriété intrinsèque, qu'on peut minimiser sa manifestation par une bonne stratégie de maintenance, mais on ne peut jamais la faire disparaître. La stratégie de maintenance a pour objectif de maintenir l'état de bon fonctionnement et diminuer le coût de défaillance, qui peut affecter toute l'opération de production du pétrole et rend le coût du baril excessivement élevé ; par exemple le coût direct (d'acquisition) d'une butée du Top Drive dépasse **62 000** dollars, par contre les coûts indirectes (frais de perte de production) sont beaucoup plus élevées.

Les Top Drives possèdent généralement un palier de butée qui a pour but de supporter tous le poids du train de sonde lors du forage, ainsi naturellement c'est la partie la plus défectueuse vue les charges importantes exercées sur elle, malgré ça les politiques de maintenance n'accordent pas beaucoup d'importance pour cette pièce maitresse, ainsi toutes les procédés usuels de graissage, de lubrification et aussi le non-respect de la maintenance systématique, induit les facteur de l'usure, et ce palier tombe défaillant relativement vite malgré sa robustesse. D'autres facteurs sont liés de façon impérative à l'imprudence humaine ou des mauvaises manipulations lors du forage, ou l'utilisation des matières de rechange n'est pas sur les normes.

L'automatisation de la fonction maintenance par les modèles d'intelligence artificielle : **Machine Learning** et **Deep Learning** fait réduire les erreurs du contrôle humain. Ces modèles sont appliqués aux différents domaines (Le reconnaissance des motifs, objets, formes ; la robotique ; la météo, ...etc.), grâce à de ses performances.

Dans ce mémoire, une approche de surveillance automatique basée sur les enregistrements des capteurs sera introduite, présentant les différentes étapes nécessaires pour créer les modèles algorithmiques. A cause de la sensibilité commerciale et technique, ces bases des données restent difficiles à obtenir. La simulation sous **Matlab** des conditions du travail des Top Drives qui pourra nous offrir des résultats pour l'apprentissage des algorithmes et la prédiction de l'état du matériel.

Ce mémoire est divisé en quatre (04) chapitres :

Introduction générale

Chapitre I : Description du chantier pétrolier.

Chapitre II : Classification des Top Drives.

Chapitre III : Chapitre III : Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

Chapitre IV : Surveillance automatique d'état de la butée BFS-8033 par l'IA.

Et on terminera ce travail par une **Conclusion générale**.

Chapitre I

Description du chantier pétrolier

Introduction

Le forage pétrolier est un domaine de travail très difficile, compliquée, onéreux et aussi très dangereux, à cause de la diversité des opérations, de la complexité des équipements utilisés et l'exigence des personnes impliquées dans ce travail car cela demande une grande connaissance aux différents équipements de chantier pétrolier.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en exergue dans un premier lieu, le forage (en particulier le rotary), la classification des appareils de forage et leurs équipements principaux.

I.1. L'industrie pétrolière

Le pétrole est devenu, à partir des années 50, la première source d'énergie dans le monde. Il satisfait plus de 30 % des besoins énergétiques mondiale. C'est la principale matière première des carburants qui alimentent les transports (voitures, camions, avions...etc.). C'est aussi une matière première irremplaçable pour l'industrie de la pétrochimie pour un grand nombre de produits de la vie quotidienne : matières plastiques, peintures, colorants, cosmétiques, etc. Enfin, le pétrole sert aussi comme combustible dans le chauffage domestique et comme source de chaleur dans l'industrie, La consommation mondiale de pétrole représente 97,4 millions de barils par jour (Mb/j) en 2017, soit l'équivalent de 1 127 barils ou 179 000 litres par seconde [1].

On dénombre environ 30 000 gisements rentables dans le monde, répartis sur quelques dizaines à quelques centaines de km². Parmi eux, l'on distingue 450 à 500 gisements dits "géants" (avec des réserves supérieures à 70 millions de tonnes), dont une soixantaine de "super-géants" (avec des réserves supérieures à 700 millions de tonnes). Ces gisements sont répartis de manière très inégale : 60 % des "super-géants" sont au Moyen-Orient et représentent 40 % des réserves prouvées de la planète [1].

L'exploration pétrolière commence par l'identification d'indices permettant de supposer où se trouve le pétrole et en quelle quantité. La phase d'exploitation du gisement qui demande la mise en place de tout l'équipement nécessaire pour le forage qui représente 40 à 60 % du coût total d'un projet [1].

I.1.1. Le forage

Le forage est l'ensemble des techniques permettant de creuser un puits jusqu'à des profondeurs parfois élevées et l'emplacement des gisements pétroliers est déterminé grâce à des études géologiques et géophysiques, en fin Le forage proprement dit est mis en place après les forages d'exploration.

Les types de forage varient en fonction des lieux de gisements ; Sur la terre ferme, on utilise généralement des plates-formes de forage fixes ; Pour le forage sous-marin, les installations varient en fonction de la profondeur et doivent pouvoir conserver une mobilité relative, et un tel forage coûte plusieurs fois (3 à 4 fois) le prix du plus cher des forages à terre [7].

Les techniques modernes de forages permettent de forer en déviation à partir d'un seul point, cela limite les dimensions des installations de surface en concentrant les puits (limite la

déforestation ou la taille des plates-formes offshore). Les puits peuvent simplement être déviés ou réellement horizontaux, optimisant ainsi la surface d'échange entre le puits et la roche réservoir, les puits horizontaux peuvent avoir des productivités cinq à dix fois supérieures aux puits verticaux [5].

I.1.1.1. Le forage rotary

C'est le procédé le plus utilisé de nos jours dans la construction des puits de pétrole et de gaz, car il permet d'obtenir les meilleures vitesses d'avancement et surtout d'atteindre des profondeurs élevées (de l'ordre de 12500 mètres).

La méthode Rotary consiste à utiliser des trépan à dents types tricônes ou des trépan monoblocs comme les outils diamants ou **PDC**, sur lesquels on applique une force procurée par un poids tout en les entraînant en rotation. L'avantage de cette technique est de pouvoir injecter en continu un fluide aux niveaux de l'outil destructif de la formation pour emporter les déblais hors du trou grâce au courant ascensionnel de ce fluide vers la surface.

La sonde de forage Rotary (Figure I.1) est l'appareillage nécessaire à la réalisation des trois fonctions suivantes :

- Poids sur l'outil ;
- Rotation de l'outil ;
- Injection d'un fluide [8].

L'objectif d'un appareil de forage (**AdF**) est d'accomplir dans les meilleures conditions techniques, économiques et de sécurité, la réalisation d'un puits reliant un gisement à la surface.

I.1.2. La classification et le choix d'un appareil de forage

Un appareil de forage doit accomplir dans les meilleures conditions techniques et de sécurité, la réalisation d'un puits reliant un gisement à la surface [10].

Il existe toute une gamme d'appareils : légers, moyens et lourds ; appropriés aux forages, peu, moyennement et très profonds ; deux caractéristiques relativement liées interviennent donc dans la classification d'un appareil de forage (Tableau I.1) :

- ☞ La capacité de profondeur de forage maximale
- ☞ La puissance au treuil

Type d'AdF	Profondeur atteinte (pieds)	Profondeur atteinte (mètres)	La puissance (HP)
Léger	4 921' à 6 561'	1 500 à 2 000	650
moyen	11 482'	3 500	1300
Lourd	19 685'	6 000	2000
Super lourd	26 646' à 32 805'	8 000 à 10 000	3000

Tableau I.1 – Classification des appareils de forage selon la puissance de levage [3]

La puissance de treuil c'est une caractéristique primordiale pour déterminer un AdF (pour 100 pieds de forage, il faut 10 HP de puissance au treuil) [3].

Le choix d'un type d'appareil de forage dépend de plusieurs études et paramètres à savoir : les capacités de levage, pompage, les possibilités du quartier boue, les équipements de sécurité tels que **BOP**, choke et manifold ; puis l'adéquation de tous ces éléments avec le programme de forage et de tubage, compte-tenu des règles de sécurité que le maître d'œuvre s'impose et du type de contrat de forage que l'on souhaite [8].

I.1.3. La description d'un appareil de forage

L'appareil de forage est constitué d'un ensemble d'équipements, des techniques opératoires et un personnel très qualifié.

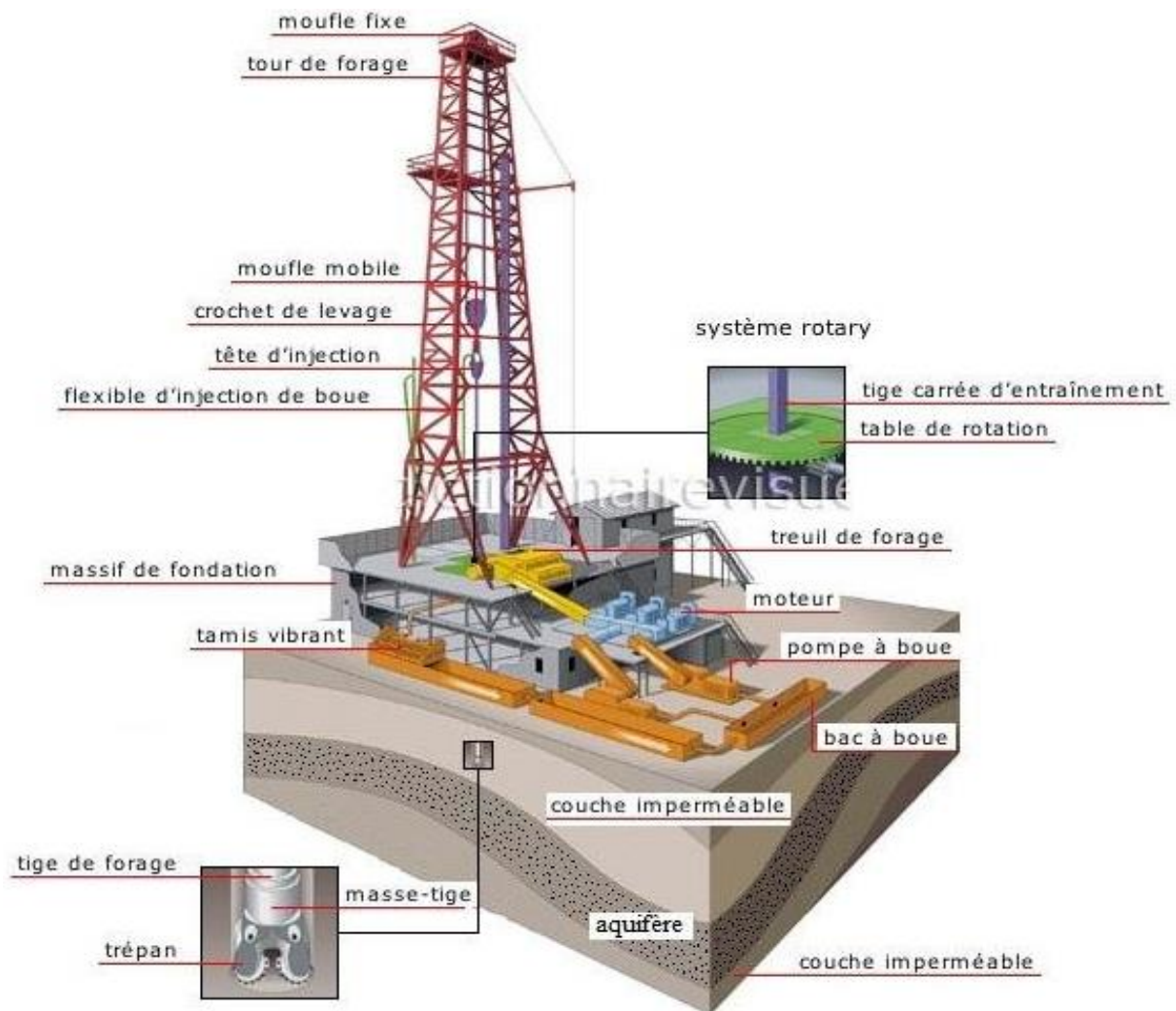


Figure I.1 – Description simplifiée d'un Appareil de forage [6]

Un **AdF** (Figure I.1) est constitué d'un mât (**derrick**) servant à descendre le train de tiges de forage, au bout desquelles se trouve un trépan.

Le train de tiges de forage est constitué d'un ensemble de tubes vissés les uns au bout des autres, au fur et à mesure de sa descente au fond du puits. Le trépan découpe la roche au fond du puits, à la tête du forage. Un fluide (mélange à base d'eau et d'argiles) est injecté dans le puits pour contenir les bords du puits et remonter les déblais (**cuttings**). D'autres outils sont également disponibles utilisant des fraises garnies de dents en diamant synthétique.

I.2. Les Equipements du chantier pétrolier

Ils sont conçus de deux parties, les équipements de surface et équipements de fond :

I.2.1. Les équipements de fond

Ce sont les équipements conçus pour travailler au sous-sol.

I.2.1.1. La garniture de forage (Drill stem or Drill string) : est la partie active non visible, qu'assure la liaison entre l'outil de forage et la surface. Elle est constituée, de deux parties principales, la partie haute formée de tiges et la partie basse de l'assemblage de fond.

Dont le rôle est de :

- Permettre la rotation de l'outil et appliquer-lui du poids.
- Permettre la circulation du fluide de forage
- Guider, réaliser et contrôler la trajectoire du puits [4].

La partie supérieure de la garniture travaille en traction, tandis que la partie inférieure travaille en compression pour appliquer le poids sur l'outil.

La garniture de forage est composée de :

- Tiges de forage ou **Drill Pipes**
- Tiges lourdes ou **Heavy Weight Drill Pipes**
- Tige d'entraînement ou **Kelly**
- Masses-Tiges ou **Drill Collars**
- Accessoires tels que : Réducteur, Aléseurs, Stabilisateurs [4]

a. Les tiges de forage (Drill-pipes)

Ce sont des tubes métalliques d'un corps généralement uniforme fabriqués selon les normes **API**. D'environ 9 mètres de longueur et d'un diamètre extérieur pouvant aller de 60 à 160 millimètres. Leur épaisseur est de l'ordre du centimètre. Elles sont raccordées les unes aux autres par des joints filetés coniques, un Tool-Joint mâle et un Tool-Joint femelle, ces Tool-Joint sont filetés de manière à ce que les tiges soient vissées les unes sur les autres pour former un train de tiges. L'ensemble du train de tiges est sollicité en traction et en torsion due à l'entraînement des tiges à partir de la table de rotation [8].

b. Les tiges lourdes (Heavy weight drill pipes)

Les tiges lourdes ont une flexibilité plus grande que celle des masses tiges et plus petite que celle des tiges normales. Dans les forages verticaux, les tiges lourdes sont fréquemment utilisées comme intermédiaires entre les masse-tiges et les tiges. Il y a à ce niveau une variation de section occasionnant des contraintes plus élevées (flexion plus grande, vibrations). On utilise donc avantagement une, deux ou trois longueurs de tiges lourdes, entre les masse-tiges et les tiges, chaque fois que les conditions de forage sont difficiles. Dans les forages dirigés, les tiges lourdes sont utilisées soit au sommet des masse-tiges, soit parfois en les remplaçant totalement [6].

c. Les masses tiges (Drill Collars)

Ce sont des tubes d'aciers très épais, beaucoup plus lourds que les tiges de forage. Elles sont destinées à être utilisées en compression pour mettre du poids sur l'outil. Les masses tiges sont généralement désignées par le diamètre extérieur et le diamètre intérieur.

Parmi ses rôles l'application du poids sur l'outil, contrôler la trajectoire, dans les puits verticaux, une partie en compression pour mettre le poids sur l'outil ; Le reste en traction pour éviter d'avoir les tiges en compression.

Il y a un nombre limité de masses tiges pour limiter le flambage, la fatigue, les risques de rupture de la garniture, et aussi pour éviter les pertes de temps en manœuvre [4].

d. Les stabilisateurs

Ce sont des tubes de longueur nettement plus faible que celle des masses-tiges, dont le diamètre extérieur est voisin de celui du trépan. Ils sont placés au niveau des masses-tiges, pour assurer le centrage et le guidage de l'assemblage de fond. Ils maintiennent le trépan perpendiculaire à la formation, ce qui augmente sa performance. Le pourtour des stabilisateurs, et parfois celui des masses-tiges est constitué de lames spiralées pour faciliter la remonter de la boue.



Figure I.2 – Stabilisateur ; Tiges de forage ; Masses tiges [4]

I.2.1.2. Les outils de forage

Le temps de forage représente 60 % du coût d'un puits et donc les techniques de forage utilisées ont un grand impact économique [4]. 30 à 50 % de cette partie est liée au forage et manœuvres. Il est donc très important d'optimiser les paramètres de forage qui conditionnent la vitesse d'avancement. C'est l'outil qui assure sous l'effet du poids du train de sonde et de rotation la destruction des roches, chaque outil destiné à des conditions spécifiques de forage [4].

a. Les outils à molettes :

Ils sont constitués de trois cônes tournant de façon indépendante et montés sur trois bras réunis entre eux par soudure constituant le corps de l'outil. Plusieurs types de roulements sont utilisés (rouleaux avec ou sans étanchéité, paliers de friction, système de lubrification...etc.).

L'efficacité d'un outil à molettes dépend de sa capacité à broyer et évacuer les morceaux de roche. Ces outils travaillent par la compression produisant la pénétration de la dent ou du picot dans la formation et l'éclatement de la roche, ou par ripage de la molette sur elle-même, arrachage sur terrain tendre.

La taille ou l'épaisseur des différents constituants de l'outil dépendent du type de formation à forer.

Les outils à picots en carbure de tungstène ont permis d'améliorer les performances de forage dans les formations dures.

b. Les outils diamant

Elles ne possèdent pas de pièces tournantes ; ces sont des outils monobloc. Les diamants naturels et synthétiques sont utilisés pour leur fabrication.



Figure I.3 – Les outils diamant ; les outils à molettes [4]

I.2.1.3. Les tubages (Casing)

Le tubage est un tube en acier sans soudure ou soudé électriquement et d'un système de connexion à ses extrémités, dont le rôle est de :

- Contenir les fluides à l'intérieur du puits
- Tenir les terrains forés et continuer le forage en toute sécurité
- Rétablir et maintenir des étanchéités entre couches
- Assure une bonne qualité d'isolation.

Les centreurs : il est nécessaire de centrer le casing dans le trou pour que la gaine de ciment assure une bonne qualité d'isolation [4].

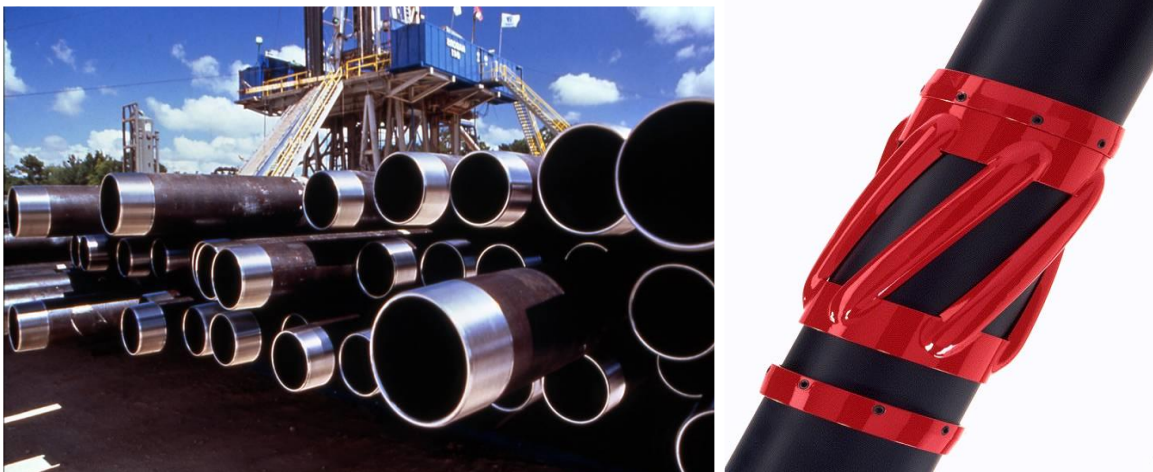


Figure I.4 – Les tubages ; Le centreur [4]

I.2.1.4. Les accessoires de la garniture

- Stabilisateurs.
- Aléseurs.
- Tige d'entraînement : Elle est de forme hexagonale et permet de transmettre, par l'intermédiaire de la garniture, le mouvement de rotation au trépan.
- Carré d'entraînement : Il entraîne la garniture par l'intermédiaire de la table de rotation.
- Coins de retenue ou Câles pour tiges.
- Coins de retenue ou Câles pour les masses-tiges.
- Clés de serrage (Vissage, dévissage).
- Elévateur pour tiges et pour les masses-tiges.
- Crochet de lavage.

I.2.2. Les Equipements de surface

Ce sont les équipements au-dessus du trou de forage, et situées le périmètre de **AdF** qui sont assurer le déroulement du procès de forage.

I.2.2.1. Equipements de levage

Pour soulever la garniture de forage (ensemble tiges-tiges, lourdes–masse-tiges), il faut utiliser une grue de grande capacité, car la garniture de forage peut atteindre un poids supérieur à 150 tonnes ou plus. Pour contrôlée le poids sur l’outil (**WOB**), et la réalisation des différentes manœuvres de garniture et tubages ; Cette grue est constituée [6] :

a. Les structures de forage

Il existe trois grandes catégories de structures : la tour, le mat et le mât haubané monté sur une remorque, ces structures ont des caractéristiques techniques spécifiques qui ont un rôle commun pendant le forage.

- ✓ La manœuvre de remonté et de descente du train de sonde ;
- ✓ Le stockage de train de sonde après sa remonté ;
- ✓ La descente des colonnes de casing.
- **La tour** : C'est la plus ancienne forme qui dérive de la tour construite en bois. Elle est en forme de pyramide très pointue, dont les quatre pieds s'appuient sur les sommets d'un carré, cette surface sera le plancher de travail.
- **Le mât** : Le mât est une structure en forme de **A** très pointu. Il a la particularité d'être articulé à sa base ce qui lui permet d'être assemblé ou démonté horizontalement puis relevé en position verticale en utilisant le treuil de forage et un câble de relevage spécial.
- **Le mât haubané monté sur remorque** : C'est le domaine des appareils légers et des appareils spécialisés dans le **work-over**
- **Les substructures** : Ces constructions répondent au besoin de surélévation de plancher de forage pour laisser la place à l'empilage de têtes de puits ainsi que de **BOP**. Elles peuvent être indépendantes du mat de levage [8].

b. Le mouflage

Le mouflage (Figure I.6) est le moyen de démultiplication des efforts le plus répandus et le plus simple pour manipuler des lourdes charges. Le mouflage comprend un câble qui passe successivement sur les poulies d'un moufle fixe (crown bloc) et sur les poulies d'un moufle mobile (travelling bloc) avant de s'enrouler sur le tambour d'un treuil. L'autre extrémité du câble est fixée à un point fixe ou réa (Figure I.7 (c)) pour retenir le brin mort et permettre le filage du câble.

Les câbles utilisés sur l'installation de sondage sont des câbles en acier mais dont l'âme peut parfois être en chanvre. Autour de l'âme sont enroulés des torons, chacun de ces torons étant composés d'un certain nombre de fils d'acier.

Dans un mouflage conventionnel, les principaux facteurs affectant la durée de vie des câbles sont : la fatigue, l'usure et l'accrochage des fils, l'augmentation de la fragilité des fils par échauffement.

On coupe le câble de forage, pour enlever l'excédent de câble sur le tambour du treuil et libérer de la place pour les filages à venir [9].

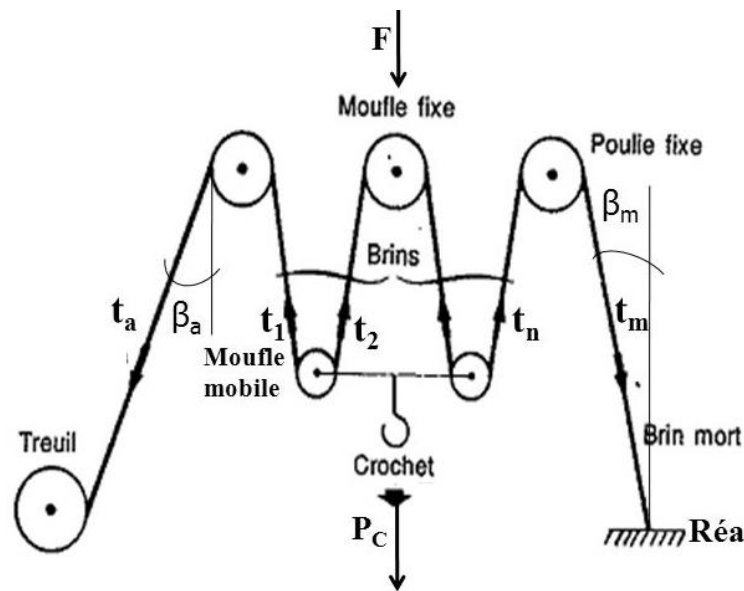


Figure I.5 – Le système de mouflage [8]

c. Le treuil (Draw Work)

C'est le cœur de l'appareil de forage, donc c'est la capacité du treuil qui caractérise un appareil de forage et indique la classe de profondeur des forages que l'on pourra effectuer.

Le treuil de forage regroupe un ensemble d'éléments mécaniques et assure plusieurs fonctions :

- ❖ Les manœuvres de remontée et de descente (levage) du train de sonde à des vitesses rapides et en toute sécurité, ce qui constitue sa principale utilisation.
- ❖ L'entraînement de la table de rotation quand celle-ci n'est entraînée par un moteur indépendant.



Figure I.6 Le Treuil (Draw Work) [15]

❖ Le vissage et dévissage du train de sonde ainsi que les opérations de curage [6]. Parmi les parties principales de treuil on trouve le tambour et les freins avec une boîte de vitesse pour manipuler la puissance des moteurs et transmettre au tambour une gamme de vitesses progressives, nécessaires pour la fonction forage.

- a. **Le tambour de manœuvre** : monté sur l'arbre principal de treuil, le tambour de manœuvre permet l'enroulement et le déroulement du câble de forage suivant que l'on remonte ou descende le train de sonde. Les deux côtés du tambour figurent des rouleaux qui évitent l'usure par frottement du câble sur les joues du tambour.
- b. **Le frein principal (frein mécanique à bandes)** : Il est mécanique à bandes de type auto-serreur. Il est constitué de deux bandes métalliques circulaires équipées de garnitures (patins) reliées aux bandes par des boulons à têtes fraisées. Ces bandes sont reliées par une barre d'équilibrage qui répartit les forces entre les deux bandes et réduit ainsi l'usure des patins. La surface des jantes est généralement cémentée afin de résister à l'usure, et une circulation d'eau à l'intérieur des jantes pour dissiper la chaleur dégagée.

Le treuil est équipé par des freins supplémentaires comme les freins hydrauliques et les freins électromagnétiques.

d. Les moufles fixe et mobile

i. **Moufle fixe** : C'est l'ensemble des poulies sur lequel passe le câble. Il est supporté par la plate-forme supérieure de la tour de forage.

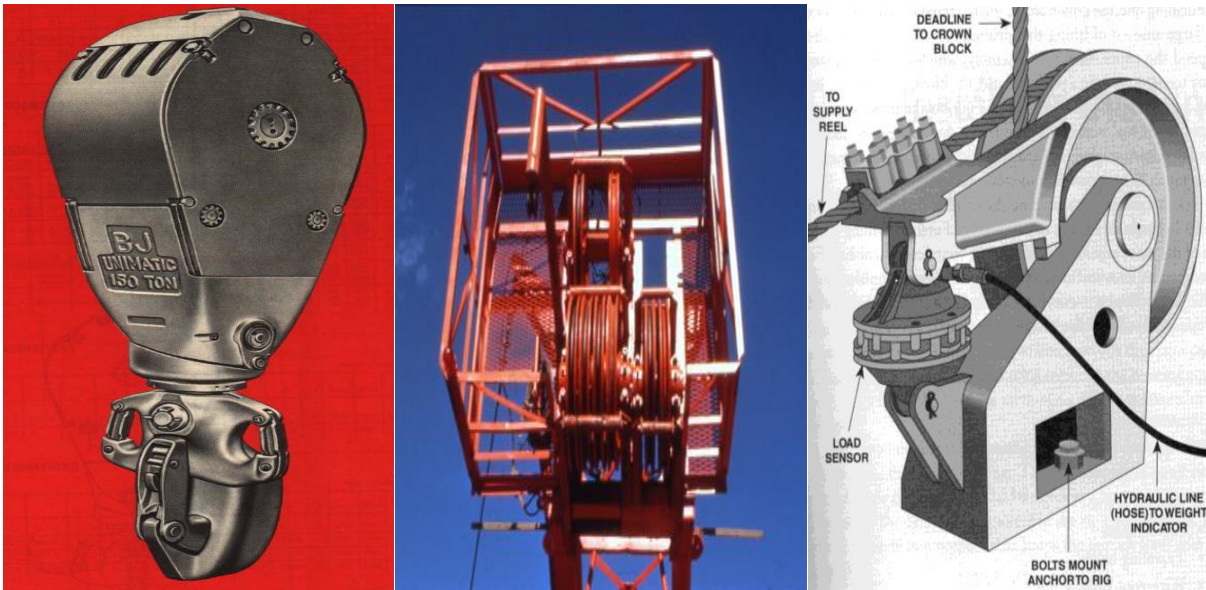


Figure I.7 – Moufle mobile et crochet ; Moufle fixe ; Le réa [4]

ii. Moufle mobile : Ensemble de poulies à grand diamètre enfilées côte à côte sur un arbre en acier et tournant librement grâce à des roulements à rouleaux.

Le moufle mobile et le crochet sont en générale dits intégrés, c'est-à-dire que l'ensemble des poulies et du crochet est assemblé d'une manière compacte.

Le crochet comporte un amortisseur pour limiter les chocs à la reprise de la charge et faciliter le vissage des connexions. Aux deux oreilles latérales sont suspendus les bras de l'élévateur [6].

I.2.2.2. Equipements de pompage et de circulation

La fonction pompage assure l'acheminement du fluide de forage depuis l'aspiration de la pompe jusqu'au retour aux bassins [6].

a. La pompe à boue

La pompe de forage est l'organe principal de la fonction Pompage. Elle permet d'aspirer le fluide des bacs à boue et de le refouler dans le circuit hydraulique.

Les pompes utilisées dans le domaine pétrolier sont du type Triplex (3 pistons) Simple Effet, Duplex (2 pistons) Double Effet, et Sextuplex (6 pistons). Quel que soit son type, une pompe de forage est constituée de 2 parties :

Partie Mécanique : Transmettre aux pistons de la pompe la puissance du moteur d'entraînement.

Partie Hydraulique : Elle transforme le mouvement rotatif en un mouvement alternatif.

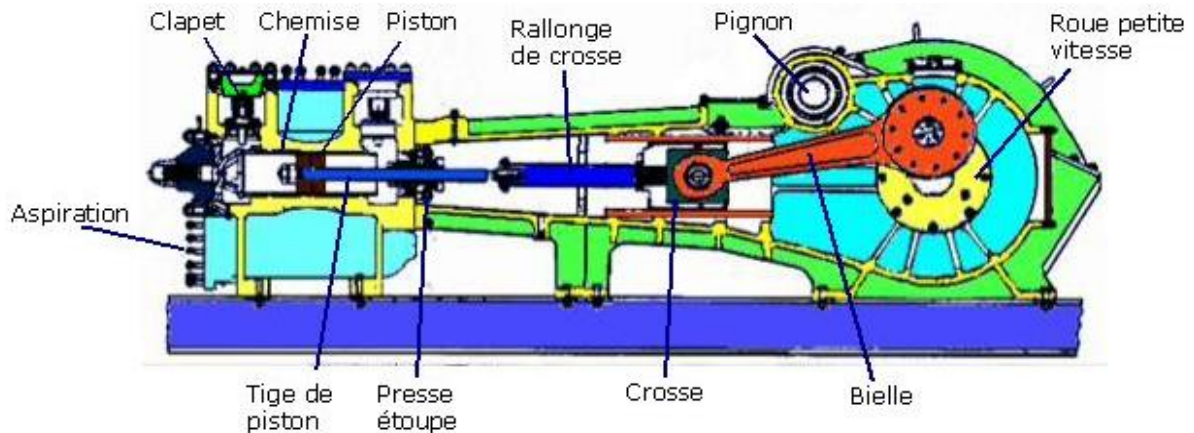


Figure I.8 – Schéma d'une pompe à boue triplex simple effet [9]

b. La boue de forage

La boue de forage est un paramètre de forage important qui en plus de son rôle d'évacuateur des déblais assure un rôle de fluide de coupe. Le foreur peut en modifier la composition et le débit. On en déduira les volumes et débits et les caractéristiques de fluide nécessaires ce qui guidera pour le choix de l'appareil de forage et les calculs des consommations en produits boue, d'eau, d'huile. On distingue la boue à base d'eau (benthonique) pour inhiber les argiles, et la boue à base d'huile.

La boue de forage a le rôle de :

- ❖ Nettoyer et transporter les déblais
- ❖ Maintenir les fluides dans les formations
- ❖ Refroidir et lubrifier l'outil et la garniture
- ❖ Transporter les informations du **MWD/LWD**, etc...
- ❖ Fournir l'énergie nécessaire pour faire tourner les équipements de fond
- ❖ Suspend en partie le poids de la garniture de forage ou du casing [4]

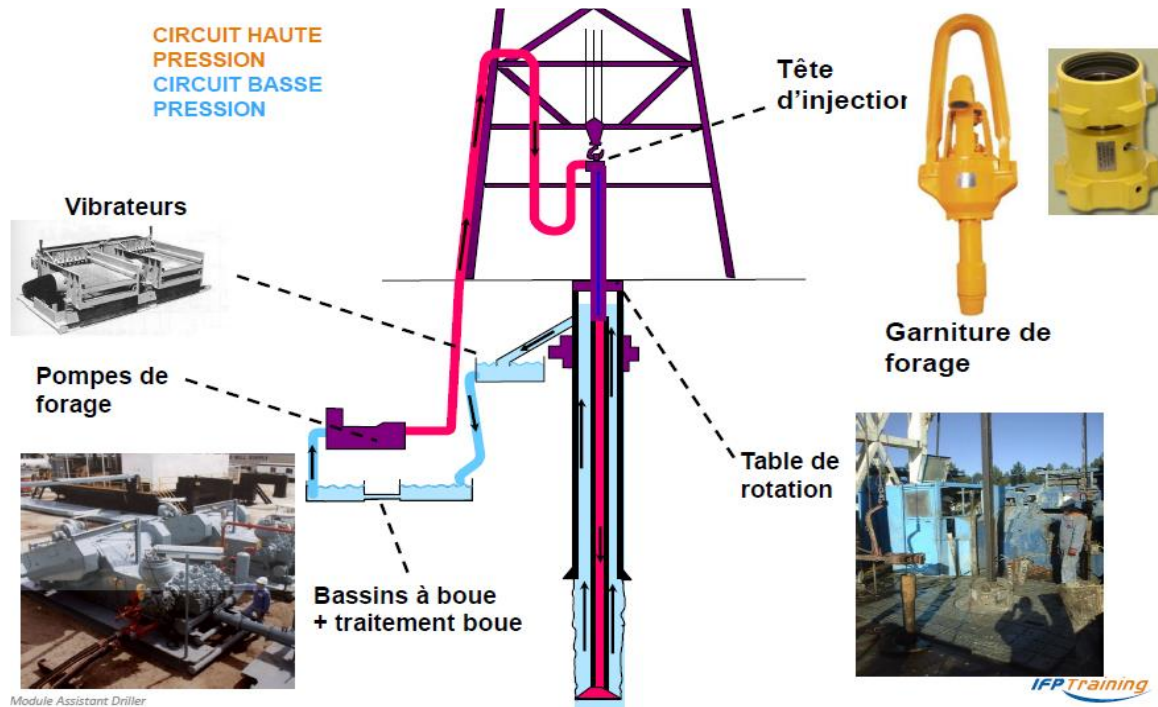


Figure I.9 – Système de circulation de boue de forage [4]

Généralement, le liquide de forage circule en circuit fermé, à partir des pompes, dans le puits et remonte les déblais de terrain vers les équipements d'épuration et de nouveau vers les pompes.

En cours de forage, la boue se charge en déblais qui doivent augmenter la densité de la boue, modifie ses caractéristiques physiques et la rend abrasive. Il doit éliminer au maximum en surface avant d'être recyclés dans le trou.

Afin d'assurer la circulation du liquide, les installations de forage sont équipées d'un système de circulation qui est destiné à amener le liquide de forage sous pression à partir des pompes vers la tête d'injecteur, se déplaçant de haut en bas et vice versa, à renvoyer le liquide de la tête de puits dans les bacs à boue, à éliminer les déblais du liquide et à préparer un nouveau liquide de forage [9].

I.2.2.3. Equipement de sécurité et de contrôle de venues

Le risque majeur de forage des puits est l'éruption (**blowout**), parce qu'il y a de pression élevée dans les couches, afin d'éviter une éruption de gaz et d'huile, la tête de puits est munie de dispositifs d'étanchéité de sécurité appelés obturateurs de sécurité (**BOP**) [6].

Si les **BOP** ne peuvent plus contrôler une venue sous pression, le puits est en éruption incontrôlée, c'est une situation généralement catastrophique :

Blessures ou mort du personnel, pertes financières très importantes, dommages graves pour l'environnement [4].

Les obturateurs et leurs accessoires (Figure I.9) sont pour les fonctions d'assurer la fermeture du puits quand nécessaire, et de permettre du contrôle du puits. Les **BOP** assurent le contrôle secondaire (deuxième barrière de sécurité) alors que la boue assure le contrôle primaire (première barrière).

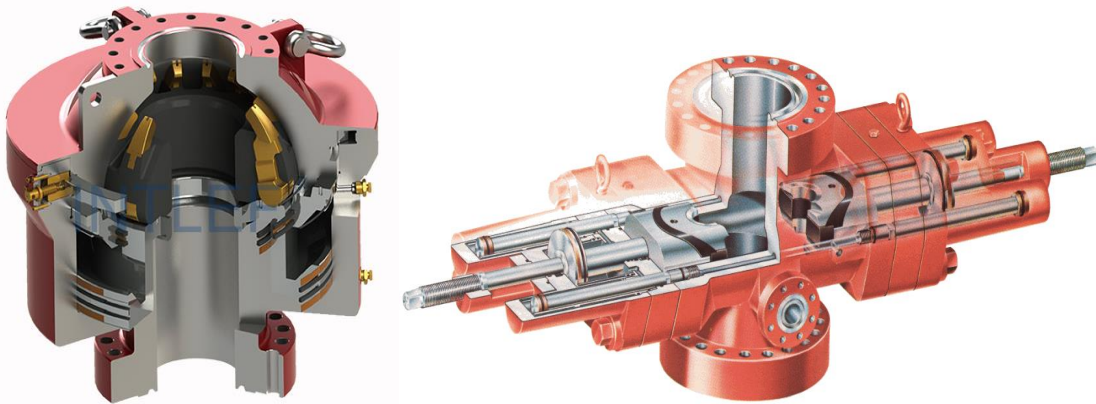


Figure I.10 – BOP annulaire [13] ; BOP à mâchoires [9].

a. L'unité d'accumulation de pression (kommey)

L'unité de commande fournit le fluide hydraulique sous pression (3000 psi) pour opérer les différents obturateurs de surface et les vannes annexes. L'unité doit être placée dans un endroit protégé à distance du plancher de forage (hors du périmètre de sécurité) et facilement accessible au personnel du chantier en cas d'urgence [9].

b. Les duses et le choc manifold

Pour contrôler une venue, il faut circuler tout en maintenant une pression, la duse permettra de créer en tête de l'espace annulaire la pression manquante nécessaire pour maintenir une pression de fond correcte. On utilisera le circuit duse jusqu'au rétablissement du contrôle primaire.

La conception du manifold doit permettre, durant un contrôle, d'isoler un circuit défaillant et de continuer le contrôle sur un autre [9].



Figure I.11 – L'unité d'accumulation de pression (**kommey**) ; le choc manifold (ENF 45)

I.2.2.4. Equipement de puissance

La machine à vapeur a été remplacée par le moteur diesel comme source initiale d'énergie, mais on peut rencontrer également l'utilisation de puissance fournie par des turbines à gaz et même parfois le raccordement du chantier de forage au réseau de distribution électrique ; mais même si ce système présente des avantages majeurs tels qu'une énergie peu coûteuse, silencieuse, il modifie le caractère autonome du chantier de forage, et il a des difficultés pour être appliqué dans la majorité des rigs [8].



Figure I.12 - Moteur Diesel Caterpillar [12]

- a. **La force motrice** : est constituée d'un ensemble de génératrices ou d'alternateurs entraînés par des moteurs diesel. Dans ce dernier cas, le courant alternatif produit est redressé avant alimentation des moteurs à courant continu.
- b. **Le système de transmission** : de puissance dans le forage commence par l'arbre de sortie de chaque moteur Diesel. La puissance est alors transmise à une poulie ou à un pignon denté. Ceux-ci entraînent à leur tour par courroie ou par chaînes d'autres

arbres qui attaquent directement l'arbre principal du treuil ou le pignon d'entraînement de la table de rotation ; des transmissions séparées entraînent les pompes à boue.

La transmission diesel électrique apporte plusieurs avantages tels que souplesse, simplicité (élimination de nombreux embrayages, pignons, chaînes, etc....) et meilleure utilisation de l'espace disponible [9].

I.2.2.5. Equipements de rotation

Les équipements de système de la rotation sont conçus pour assurer le mouvement de rotation de la garniture de forage et comprend principalement :

a. La Table de rotation

En cours de forage, la table de rotation transmet le mouvement de rotation à la garniture de forage par l'intermédiaire du carré d'entraînement, les fourrures et de la tige d'entraînement (**Kelly**), en cours de manœuvre supporte le poids de la garniture de forage, par l'intermédiaire de coins de retenue. Le corps repose sur la substructure à laquelle il est solidement fixé [6]

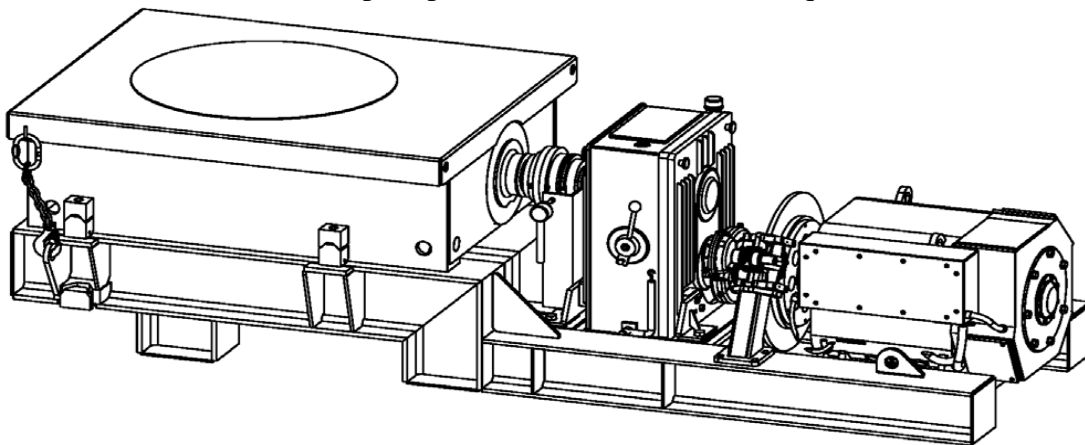


Figure I.13 – Table de rotation BENTEC RDF-375-490-VAR-350-37,3 [14]

b. La tête d'injection

La tête d'injection représente le mécanisme qui relie la partie mobile d'une installation de forage à la partie fixe. Dans une installation de forage, la tête d'injection supporte la garniture de forage et permet d'injecter la boue en rotation ou à l'arrêt.

Une tête d'injection comprend les parties suivantes :

- **Suspension** : Elle est assurée par un arbre d'injection creux fileté à sa partie inférieure pour être raccordé à la tige d'entraînement. Le corps est suspendu au moyen d'une anse au crochet du moufle mobile.
- **Injection** : La boue arrive dans l'arbre d'injection par un tube coudé appelé col de cygne relié au corps. Entre le col de cygne fixe et l'arbre d'injection tournant, qui sont dans le prolongement l'un de l'autre, il y a un raccord tournant faisant joint, qui assure l'étanchéité à la boue [9].

c. Le Top Drive (Power Swivel)

Le **Top Drive** est une tête d'injection motorisée qui en plus de l'injection, assure la rotation de la garniture de forage ainsi, on n'a besoin ni de la tige d'entraînement ni de la table de rotation pour faire tourner la garniture, c'est le **Top Drive** qui s'en charge.

Plusieurs autres options existent dans cet équipement : les bras de l'élevateur sont articulés hydrauliquement pour faciliter le travail de l'accrocheur et il possède une clé automatique et même une coulisse intégrée des rails placés tout le long du mât pour le guider dans ses déplacements [9]. Il donne plusieurs avantages comme :

- ✓ Pas de manipulation de **kelly**
- ✓ Reconnexion sur la garniture en manœuvre à n'importe quelle hauteur, forage par triple possible
- ✓ Remontée en rotation et circulation (**back reaming**)
- ✓ Carottage en grande longueur
- ✓ dégerbage de la garniture supprimé entre deux puits de développement lorsque
- ✓ Le déplacement de l'appareil de forage peut se faire mât levé et gerbage dans la tour,
- ✓ Possibilité d'application d'un couple statique pendant un temps indéterminé (seulement dans le cas d'une tête motorisée hydrauliquement) [4].

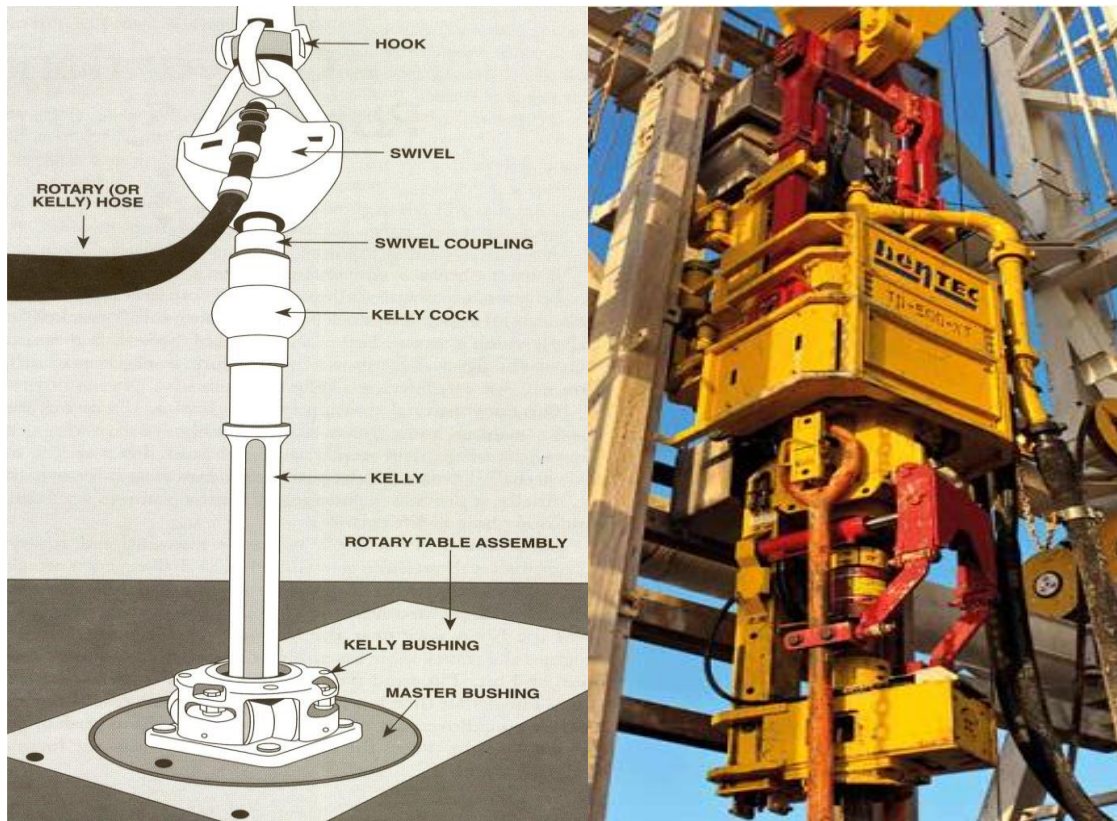


Figure I.14 – Equipements de rotation [4]. Figure I.15 – Top Drive System TD-500-XT [12]

Conclusion

Les équipements de forage sont des systèmes composés des sous-systèmes complexes ; La disponibilité de ces systèmes est essentielle pour le fonctionnement des différents processus de forage, et donc éviter les temps d'arrêtes.

Le coût de défaillance dans l'industrie pétrolière est très élevé ; il est nécessaire donc d'accorder une grande importance à la fonction maintenance et surtout aux éléments critiques, comme dans le cas d'un Top drive, car sa défaillance engendre des complications difficiles à résoudre, coûteuses et parfois mortelles.

Dans le chapitre suivant on va mettre en exergue les composants principales et les caractéristiques des Top drives : GDS, TESCO, VARCO, BENTEC et CANRIG.

Chapitre II

Classification des Top Drives

Introduction

Comme on a vu précédemment ; l'importance des systèmes de rotation dans le forage pétrolier s'amplifie avec la présence des Top Drives, ce qui fait l'objet ce chapitre avec une concentration descriptive particulière sur les Top Drives disponibles en Algérie comme : GDS, TESCO, VARCO, BENTEC et CANRIG.

II.1. Types et classification des Top Drives

Toutes les marques des TDs sont classifiées selon leur caractéristiques d'exploitation et le type du moteur générale que soit hydraulique ou électrique, c'est standardisé, donc pour :

II.1.1. Top Drive GDS

La GDS n'offre pas des TDs hydrauliques, mais elle met en disponibilité dans le marché la plus petite taille avec les options de moteur 400 cv et 600 cv. La GDS donne un équilibre parfait entre design et couple, ce qui répond aux exigences d'aptitudes au forage, efficacité à utiliser grâce au design optimisé, conception d'une boîte de vitesse qui fournit des vitesses différentes pour bien exécuter les manœuvres et une technologie d'acier pour bien gérer les 20 prochaines années de demandes de forage (robustesse). Les TDs du GDS sont conçu pour une utilisation robuste dans des climats extrêmes, couple puissant et silencieux, compatibilité offshore et terrestre, engrenages hélicoïdaux et disponibilité en option de moteur simple et double.

Dans le tableau ci-dessous classifie les gammes du GDS [15].

La gamme	Les modèles	Capacité de charge (ton)	Couple de rupture (Ft.Lb)	Couple continue (Ft.Lb)	Vitesse max (tr/min)	Puissance moteur (CV)	Poids sur crochet (ton)	Chemin de boue (Psi)
GDM150H/250H	GDM150H	150	32 000	22 000	200	400	7	5000
	GDM250H	250	32 000	26 000	200	600	8	5000
GDM275/375	GDM275	275	42 500	30 000	200	450	10	5000
	GDM375	375	60 000	42 000	200	800	12.5	5000
GDM500/650	800CV	500	70 000	45 000	250	800	16.5	5000
	1200CV	650	85 000	55 000	250	1200	19	5000
	1500CV	650	100000	76 000	250	1500	19	5000
GDM750/850	1200CV	750	90 000	55 000	250	1200	19.5	7500
	1500CV	850	110000	73 500	250	1500	22	7500
GDM1000	1500CV	1000	110000	73 500	250	1500	22.5	7500
	2300CV	1000	120000	92 000	250	Dual-AC 1150	27.5	7500

Tableau II.1-Classification des Top drives GDS [15]

La figure II.1 ci-dessous montre les différents types de la série GDS :

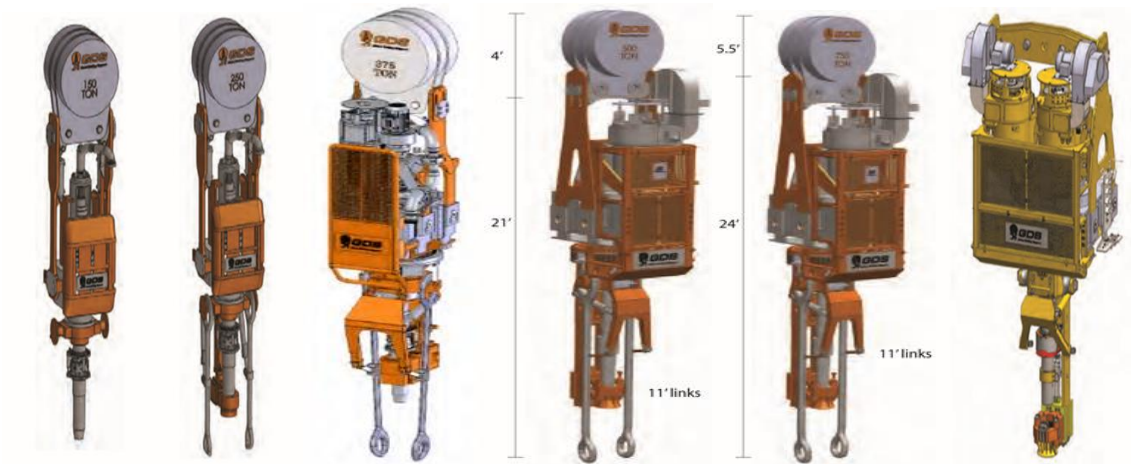


Figure II.1 – Série Top drive GDS [15]

D’après le tableau II.1 les Top drives GDS possèdent des couples différents illustrés dans la figure qui suit :

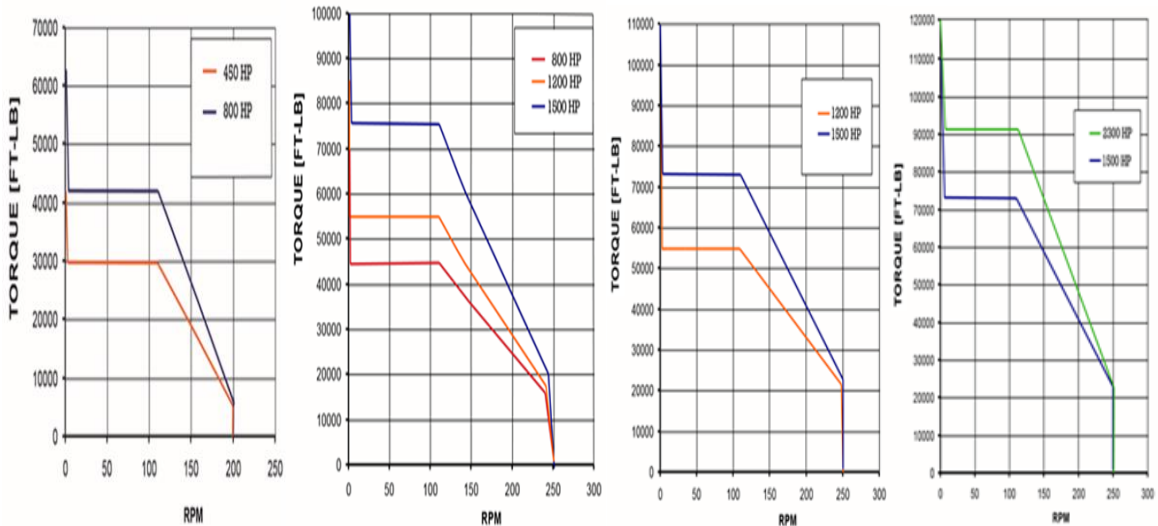


Figure II.2 - Le couple continu en fonction de la vitesse de rotation de la série GDS [15]

II.1.2. Top Drive TESCO

Pour les TDs TESCO on a en générale deux types :

Top Drives-Types et Modèles	
Hydraulique 150 HMI 475 250 HMI 475 250HXI 700 500 HS 750/1100 500 HCI 1250 650 HCI 1205	Electrique 150 EMI 400 250 EMI 400 350 EXI 600 500 ECI 900/1350 650 ECI 900/1350 750 ECIX 1350

Tableau II.2 – Types et modèles de la série TESCO [16]

II.1.2.1. TESCO électrique Top Drive

Pour les TDs électriques on a :

La gamme	Largeur fonctionnelle (CV)	Capacité de charge (ton)	Couple de rupture (Ft.Lb)	Couple continue (Ft.Lb)	Vitesse max (tr/min)	Puissance moteur (CV)	Poids sur crochet (ton)	Largeur (in)
250 EMI 400	230	250	32 000	21 000	200	400		44.5
350 EXI 600	237	350	45 000	30 000	220	600		48.5
500/650 ECI 900	172	500/650	45 000/ 56 000	36 700	193	900		62
500/600 ECI 1350	171	500/650	68 000/ 84 000	58 000	193	1350		62
750 ECIX 1350	307	750	68 000/ 84 000	58 000	193	1350		64.5

Tableau II.3- Caractéristiques des TDs TESCO électriques [16]

Disponible pour 400hp à 1350hp, les Top Drives TESCO électriques à courant alternatif sont le choix idéal pour les plates-formes modernes (terrestres ou offshore) avec une puissance électrique suffisante [16].

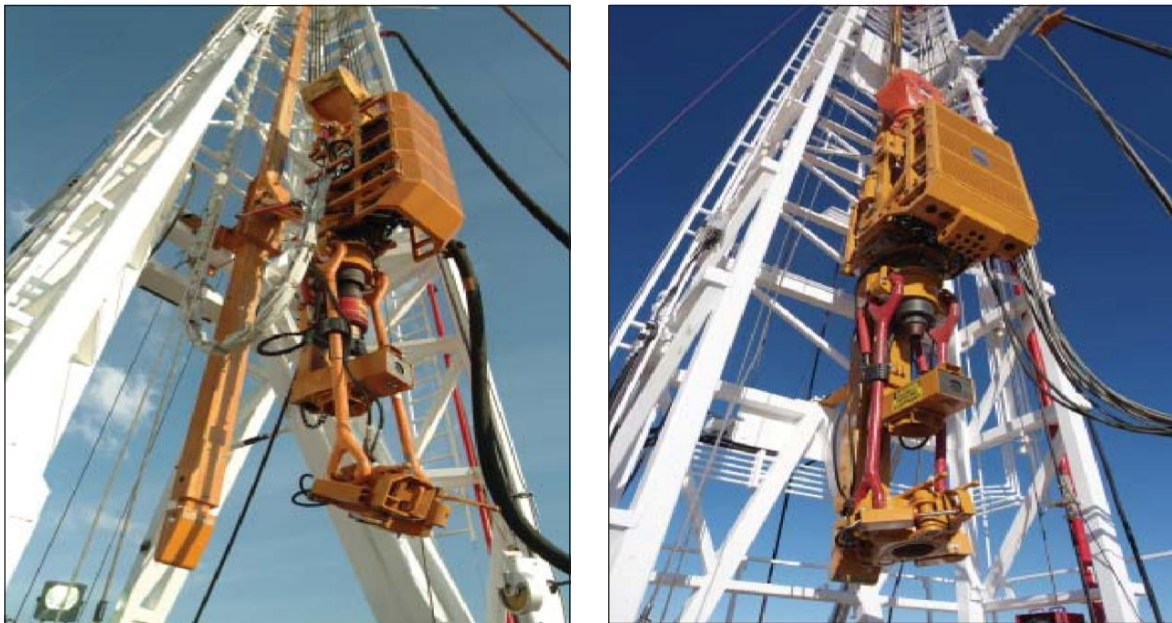


Figure II.3- TESCO 250 EMI 400 et 350 EXI 600 [16]

Le 250 EMI 400 (Figure II.3) offrent des fonctionnalités de performance et de manipulation des tiges requis pour les applications de forage, il utilise un moteur à induction CA et peut être actionné à partir d'un générateur autonome où peut être connecté directement au bus du courant alternatif de la plate-forme [16].

Le Top Drive 350 EXI 600 (Figure II.4) est équipé d'un entraînement supérieur pour forage horizontal de petites plates-formes à mât triple. Il est également disponible en configuration 400 tonnes et peut être intégré à un VFD dédié existant [16].



Figure II.4- TESCO 500/650 ECI et 700 ECIX 1350 [16]

Les Top Drives type ECI représente une avancée significative en matière de technologie d'entraînement. Assez compact pour s'adapter à n'importe quel mât triple, l'ECI fournit des performances et des caractéristiques de manipulation des tiges requises pour les applications de forage profond, ils sont disponibles en configurations 1350cv [16].

Le TD 750 ECIX 1350 possède une capacité de levage nominale de 750 tonnes, ce qui le rend parfaitement adapté à de nombreuses applications offshore [16].

Le Top Drive ECIX est conçu pour être installé sur un chariot adaptateur mais ça minimise les modifications des plates-formes lors du forage [16].

II.1.2.2. TESCO hydraulique Top Drive

Pour les TDs hydrauliques on site :

La gamme	Largeur fonctionnelle (CV)	Capacité de charge (ton)	Couple de rupture (Ft.Lb)	Couple continue (Ft.Lb)	Vitesse max (tr/min)	Puissance moteur (CV)	Poids sur crochet (ton)	Largeur (in)
250 HMIS 475	173	250	21 000/ 23 500	21 000	170	475		33
250 HXI 700	199	250	32 000	24 000	200	700		47.5
500/600 HS 750/1100	148	500/650	39 400/ 45 042	39 400	150	750/1100		64
500/600 HCI 750/1205	172	500/650	52 800/ 59 400	52 800	210	750/1205		47.25

Tableau II.4- Caractéristiques des TDs TESCO hydrauliques [16]

Disponible pour 475hp à 1205hp le HMIS travail avec des moteurs hydrauliques où diesel, ces unités sont le choix traditionnel pour une installation portable où pour réalimenter d'anciennes plates-formes mécaniques. Ces unités peuvent être expédiées économiquement et rapidement installées dans presque toutes les plates-formes dans le monde [16].

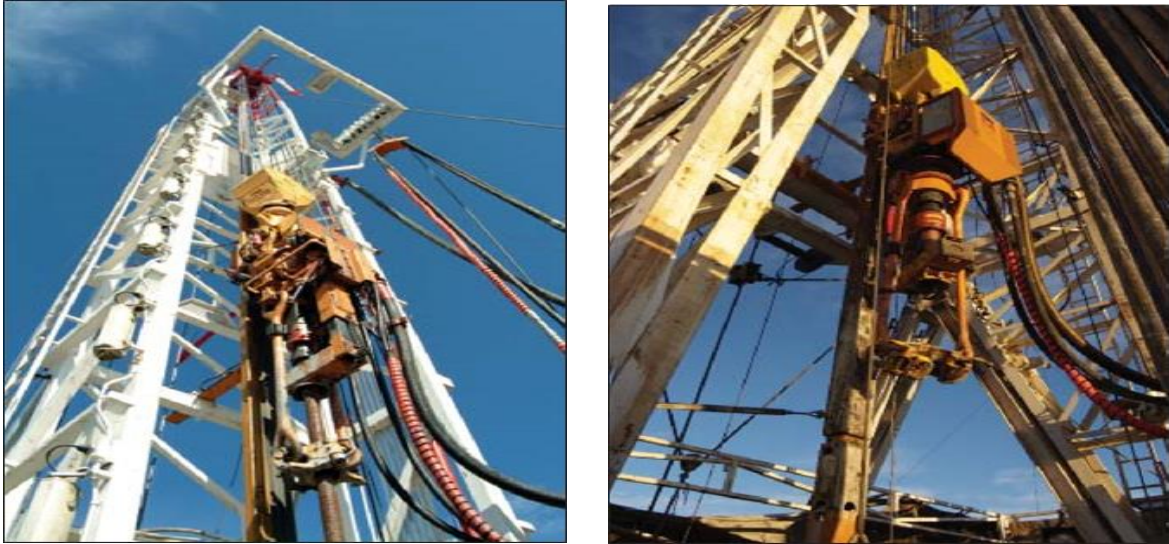


Figure II.5- TESCO 250 HMIS 475 et 250 HXI 700 [16]

Les Top Drives HMIS sont conçu pour être intégrés dans de petits mâts, le HMIS fournit des caractéristiques de performance et de manipulation des tiges destinés au forage peu profond.

Le Top Drive 250 HXI 700 (Figure II.5) est conçu pour une utilisation en mer et appareils de forage terrestre. Le 250 HXI 700 comme le HMIS, offre les performances et caractéristiques de manipulation des tiges requises pour les applications de forage et de reconditionnement [16].

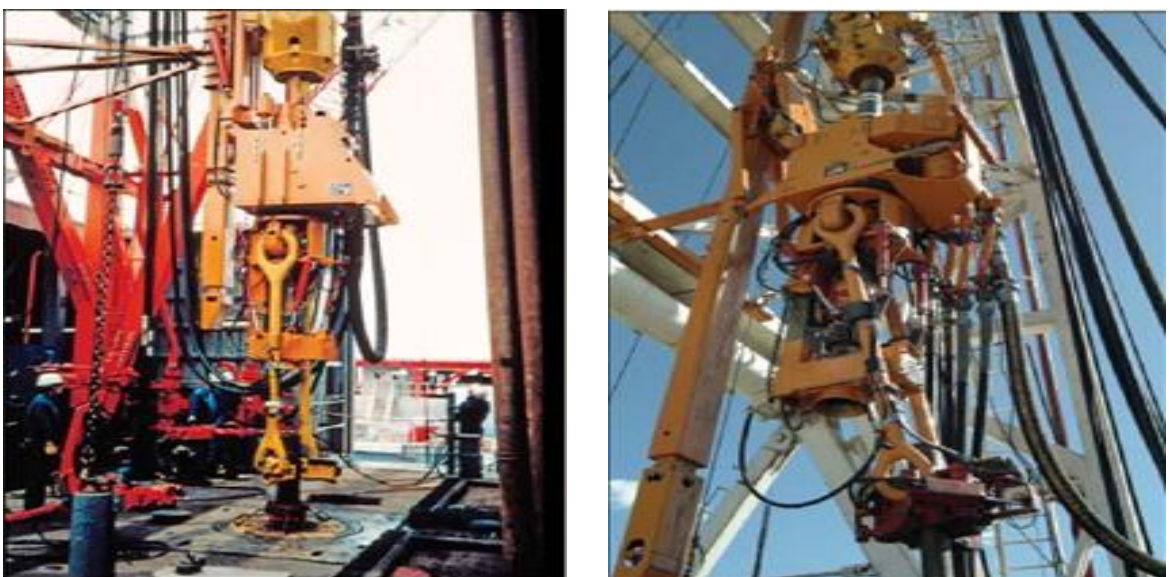


Figure II.6- TESCO 500/600 HS et 500/600 HCI [16]

Le Top Drive 500 ou 650 HS (Figure II.4) hydraulique est conçu pour des charges de tubage de 500 ou 650 tonnes, une capacité de forer avec des vitesses moyennes des forages directionnels orientés [16].

Le Top Drive 500/650 HCI 750 (Figure II.4) au 1205 cv est compact avec la plupart des mâts doubles et triples offshore ou inshore. Le HCI permet la manutention des tiges requises pour les applications de forage moyen et profond avec entraînement supérieur, ses capacités de charge du tubage sont de 500 ou 650 tonnes [16].



Figure II.7- Top Drive ESI 1000 [17]

Tesco ESI 1000 de 500 tonnes est un Top Drive électrique capable de fonctionner en offshore, conçu pour répondre aux exigences des applications de forage très complexes. Il est capable de produire jusqu'à 746 kW (1000 cv), l'ESI 1000 utilise un moteur à induction AC et un système d'entraînement, et peut être actionné par un générateur autonome ou en se connectant directement au bus CA de la plate-forme [17].

L'ESI 1000 offre toutes les fonctions critiques de manipulation des tiges, en effectuant une rotation à 360°. La conception unique d'ESI 1000 intègre le pivot, un frein à disque et la robotique de manipulation des tiges, ce qui donne une unité très compacte. Il intègre également une commande logique programmable (PLC) qui améliore les communications entre le panneau du foreur et le système d'entraînement [17].

II.1.3. Top Drive VARCO

La gamme des TDs VARCO est offerte par la compagnie NOV (National Oilwell Varco) comme suit :

II.1.3.1. Du 150 jusqu' à 350 ton Electric Top Drive

Le tableau suivant classifie les modèles en fonction de plusieurs caractéristiques comme suit :

Modèle	TDS-10SH	IDS-350 PE
Type Moteur	moteur AC à induction.	moteur AC à induction.
Puissance moteur (cv)	2 x 400	2 x 1,000
Hauteur de travail (ft) et (mm)	15,3(4,663)	20,8 (6,339)
Poids lb (kg)	18,000 lb (8.164)	33,000 lb (14.968 kg)
Rapport de démultiplication	13.1 :1	12.6 :1
Vitesse max (tr/min)	182	212
Couple continu maximum (ft.lb) et (N.m)	22,288 (30,218)	37,000 (50,165N-m)
Vitesse au couple continu maximum (tr/min)	85	145
Couple de rupture maximal (ft.lb) et (N.m)	55,000 (74,569)	65,000 (88,128)
Couple max (ft.lb) et (N.m)	42,680 (57,866)	60,000 (81,349)
Frein à blocage statique (ft.lb) et (N.m)	50,000 (67,790)	55,000 (74,569)
Levage (ton)	250	350
Course d'eau (in) et (mm)	3 (76.2)	3 (76.2)
Emballage de tuyau de lavage (psi) et (bar)	7,500 (517)	7,500 (517)
Porteur de tuyaux	PH-55	PH-65
Gamme de tiges de forage (in) et (mm)	2 ⁷ / ₈ – 5 et (73 – 127)	3 ¹ / ₂ – 6 ⁵ / ₈ et (88.9 – 168.2)
IBOP Pression nominale (psi) et (bar)	15,000 (1,034)	15,000 (1,034)
IBOP supérieur	6 ⁵ / ₈ in API Reg. RH Box (remote operated)	6 ⁵ / ₈ in API Reg. RH Box (remote operated)
IBOP inférieur	6 ⁵ / ₈ in API Reg. RH Pin/Box (manual)	6 ⁵ / ₈ in API Reg. RH Pin/Box (manual)
Rotation/Orientation	360°/illimité	360°/illimité
Température	-40°C à +55°C (-40°F à +131°F)	-40°C à +55°C (-40°F à +131°F)
Liens d'ascenseur	250 ton API	250 and 350 ton API

Tableau II.5- Caractéristiques du TDS-10SH et IDS-350 PE [18]

La figure II.8 représente les deux types du top drives mentionnés déjà, et vus dans les tableaux précédent.

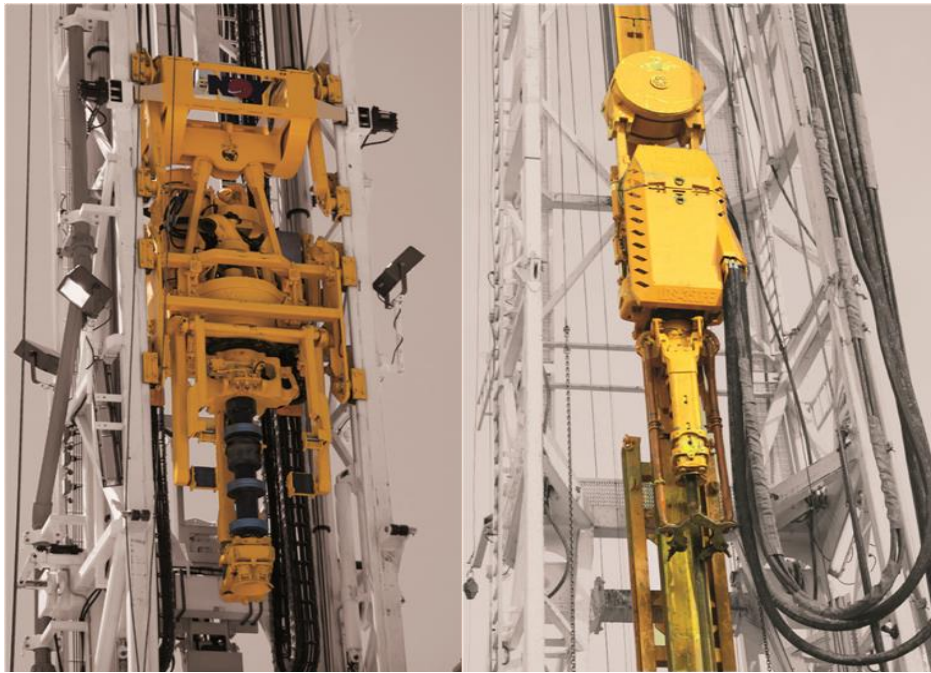


Figure II.8- TDS-10SH et IDS-350 PE [18]

II.1.3.2. Top Drive 500 Ton Electric

Ce Top drive possède les caractéristiques suivant :

Modèle	TDS-11SA	TDS-11SH	TDS-11HD
Type Moteur	Baldor reliance moteur AC à induction.	Baldor Reliance magnetic permanent moteur.	moteur AC à induction.
Puissance moteur (cv)	2 x 400	2 x 550	2 x 600
Hauteur de travail (ft) et (mm)	19 (5,791)	19 4 in (5,893)	21 et 6 in(6,553)
Poids lb (kg)	25,000 (11,567)	27,500 (12,474)	30 ,000 (13,608)
Rapport de démultiplication	10.5 :1	10.56 :1	10.56 :1
Vitesse max (tr/min)	228	288	228
Couple continu maximum (ft.lb) et (N.m)	37,500 (50,843)	51,000 (69,146)	58,800 (79,722)
Vitesse au couple continu maximum (tr/min)	110	110	110
Couple de rupture maximal (ft.lb) et (N.m)	75,000 (101,686)	75,000 (101,686)	75,000 (101,686)
Couple max (ft.lb) et (N.m)	55,000 (74,570)	62,500 (84,738)	62,500 (84,738)
Frein à blocage statique (ft.lb) et (N.m)	50,000 (67,790)	50,000 (67,790)	50,000 (67,790)
Levage (ton)	500 ton	500 ton	500 ton

Course d'eau (in) et (mm)	3 (76,2)	3 (76,2)	3 (76,2)
Emballage de tuyau de lavage (psi) et (bar)	7,500 (517)	7,500 (517)	7,500 (517)
Porteur de tuyaux	PH-75	PH-75	PH-75
Gamme de tiges de forage (in) et (mm)	3½ in – 6⅝ (88.9 – 168.2)	3½ in – 6⅝ (88.9 – 168.2)	3 ½ in – 6⅝ (88.9 – 168.2)
IBOP Pression nominale (psi) et (bar)	15,000 (1,034)	15,000 (1,034)	15,000 (1,034)
IBOP supérieur	6⅝ in API Reg. RH Box (remote operated)	6⅝ in API Reg. RH Box (remote operated)	6⅝ in API Reg. RH Box (remote operated)
IBOP inférieur	6⅝ in API Reg. RH Pin/Box (manual)	6⅝ in API Reg. RH Pin/Box (manual)	6⅝ in API Reg. RH Pin/Box (manual)
Rotation/Orientation	360 °/illimité	360 °/illimité	360 °/illimité
Température	-40°C to +55°C (-40°F to +131°F)	-40°C to +55°C (-40°F to +131°F)	-40°C to +55°C (-40°F to +131°F)
Liens d'ascenseur	250, 350 and 500 ton API	250, 350 and 500 ton API	250, 350 and 500 ton API

Tableau II.6- Caractéristiques du TDS-11SA, TDS-11SH et TDS-11HD [18]

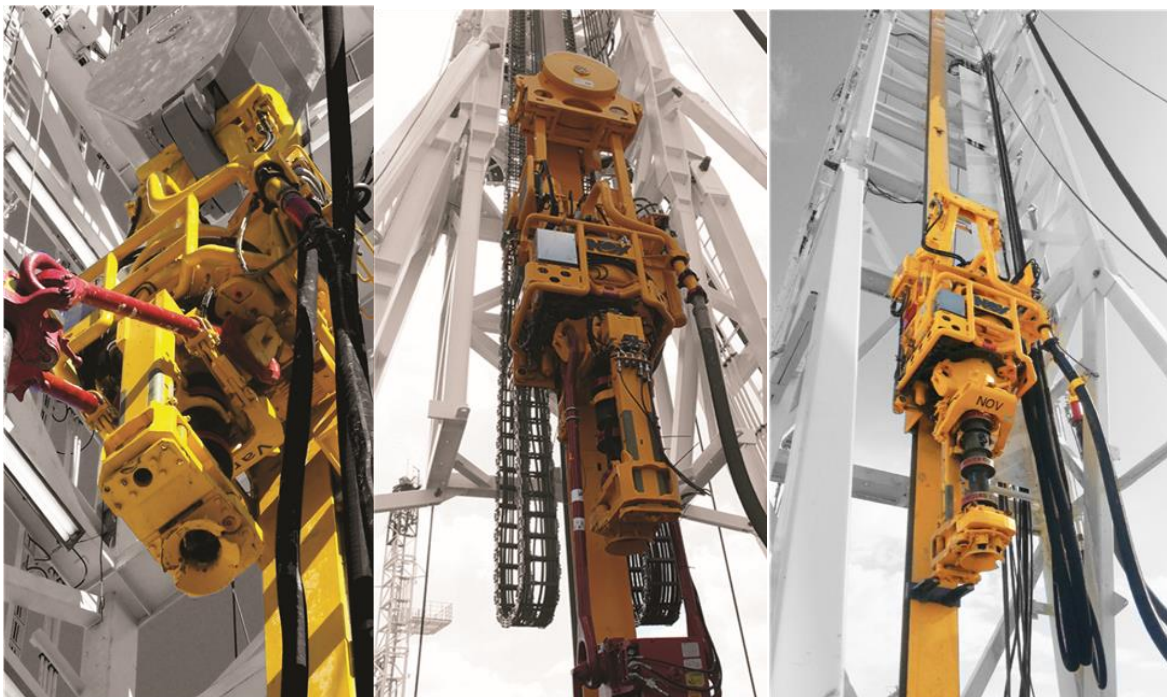


Figure II.9- TDS-11SA, TDS-11SH et TDS-11HD [18]

II.1.3.3. Top Drive 750 à 1,000 Ton Electric

Ce type est reconnu pour les caractéristiques suivantes :

Modèle	TDS-1000	TDS-8S	TDS-4S
Type Moteur	GE et AC moteur à induction.	GE et AC moteur à induction.	GE et AC moteur à induction.
Puissance moteur (cv)	2 x 1,150	2 x 1,150	1,100
Hauteur de travail (ft) et (mm)	24 (7,315)	24 (7,315)	20,8 (6,339)
Poids lb (kg)	40,000 (18,143)	38,000 (17,236)	32 ,000 (14,514)
Rapport de démultiplication	8.5 :1	8.5 :1	Faible : 7.95 :1 haut : 5.08 :1
Vitesse max (tr/min)	270	270	Faible : 130 haut : 205
Couple continu maximum (ft.lb) et (N.m)	62,250 (84,399)	62,250 (84,399)	45,500 (61,689)
Vitesse au couple continu maximum (tr/min)	95	95	120
Couple de rupture maximal (ft.lb) et (N.m)	103,000 (139,649)	103,000 (139,649)	85,000 (115,244)
Couple max (ft.lb) et (N.m)	95,000 (128,802)	95,000 (128,802)	85,000 (115,244)
Frein à blocage statique (ft.lb) et (N.m)	76,000 (103,042)	76,000 (103,042)	34,000 (46,097)
Levage (ton)	1000 ton	750 ton	750 ton
Course d'eau (in) et (mm)	3,82 (97)	3,82 (97)	3,82 (97)
Emballage de tuyau de lavage (psi) et (bar)	5000 ou 7,500 (344 ou 517)	5000 ou 7,500 (344 ou 517)	5000 ou 7,500 (344 ou 517)
Porteur de tuyaux	PH-100	PH-100	PH-85
Gamme de tiges de forage (in) et (mm)	3½ in – 6⅝ (88.9 – 168.2)	3½ in – 6⅝ (88.9 – 168.2)	3 ½ in – 6⅝ (88.9 – 168.2)
IBOP Pression nominale (psi) et (bar)	15,000 (1,034)	15,000 (1,034)	15 ,000 (1,034)
IBOP supérieur	7⅝ in API Reg. RH Box (remote operated)	7⅝ in API Reg. RH Box (remote operated)	7⅝ in API Reg. RH Box (remote operated)
IBOP inférieur	7⅝ in API Reg. RH Pin/Box (manual)	7⅝ in API Reg. RH Pin/Box (manual)	7⅝ in API Reg. RH Pin/Box (manual)
Rotation/Orientation	360 °illimité	360 °illimité	360 °illimité
Température	-20°C to +45°C (-4°F to +131°F)	-20°C to +45°C (-4°F to +131°F)	-20°C to +45°C (-4°F to +131°F)
Liens d'ascenseur	350, 500, 750 ou 1000 ton API	350, 500 ou 750 ton API	350, 500 ou 750 ton API

Tableau II.7- Caractéristiques du TDS-1000, TDS-8S et TDS-4S [18]

Ces trois TDs sont illustrées dans la figure II.10.



Figure II.10- TDS-1000, TDS-8S et TDS-4S [18]

II.1.3.4. Top Drive 1,000 à 1,500 Ton

Le TD 1,000 à 1,500 tonne possède les caractéristiques suivantes :

Modèle	TDX-1500	TDX-1250	TDX-1000
Type Moteur	Baldor reliance moteur AC à induction.	Baldor reliance moteur AC à induction.	Baldor Reliance magnetic permanent moteur Magnet OR GE AC à induction.
Puissance moteur (cv)	2 x 1,340	2 x 1,340	2 x 1,150
Hauteur de travail (ft) et (mm)	29 (8,839)	26.5 (8,077)	22 (6,705)
Poids lb (kg)	95,000 lb (43,091 kg)	89,700 lb (40,687 kg)	85 ,000 lb (38,555 kg)
Rapport de démultiplication	6.1 :1	6.1 :1	6.9 :1
Vitesse max (tr/min)	275	275	250
Couple continu maximum (ft.lb) et (N.m)	105,000 (142,360 N-m)	105,000 (142,360 N-m)	91 ,000 (123,379 N-m)
Vitesse au couple continu maximum (tr/min)	130	130	116
Couple de rupture maximal (ft.lb) et (N.m)	150,000 (203,372)	150,000 (203,372)	150,000 (203,372)
Couple max (ft.lb) et (N.m)	120,000 (162,698)	120,000 (162,698)	120,000 (162,698)
Frein à blocage statique (ft.lb) et (N.m)	105,000 (142,360)	105,000 (142,360)	105,000 (142,360)
Levage (ton)	1,500 ton	1,250 ton	1 ,000 ton
Course d'eau (in) et (mm)	4 (101.6)	4 (101.6)	3 ¾ (95.3)

Emballage de tuyau de lavage (psi) et (bar)	7,500 (517)	7,500 (517)	7,500 (517)
Porteur de tuyaux	PH-CLK	PH-150	PH-203
Gamme de tiges de forage (in) et (mm)	3½ in – 6⅝ (88.9 – 168.2)	3½ in – 6⅝ (88.9 – 168.2)	3 ½ in – 6⅝ (88.9 – 168.2)
IBOP Pression nominale (psi) et (bar)	20,000 (1,379)	15,000 (1,034)	15,000 (1,034)
IBOP supérieur	API NC84 x API NC77 (télécommandé) avec vanne à boisseau sphérique supplémentaire pour la redondance	API NC84 x API NC77 (remote operated) with additional ball valve for redundancy	API NC77 x API NC77 (remote operated) with additional ball valve for redundancy
IBOP inférieur	API NC77 x API NC77	API NC77 x API NC77	API NC77 x API NC77
Rotation/Orientation	Commande à 360°/proportionnelle avec retour de position	Commande à 360°/proportionnelle avec retour de position	Commande à 360°/proportionnelle avec retour de position
Température	-20°C à +50°C (-4°F to +122°F)	-20°C à +50°C (-4°F to +122°F)	-20 °C à +50°C (-4°F to +122°F)
Liens d'ascenseur	350, 500, 750, 1000, 1250 or 1500 ton API	350, 500, 750, 1000 or 1250 ton API	350, 500, 750 or 1000 ton API

Tableau II.8- Caractéristiques du TDX-150, TDX-1250 et TDX-1000 [18]



Figure II.11- TDX-1500, TDX-1250 et TDX-1000 [18]

Le TDX-1250 possède une capacité de 1 500 tonnes avec un entraînement supérieur et à capacité de levage élevée.

II.1.4. Top Drive BENTEC

BENTEC conçoit ses Top drives pour répondre aux exigences de performances et de fiabilité. Tout commence par la meilleure solution d'intégration possible pour s'adapter à différentes plates-formes apparaît la flexibilité d'intégrer BENTEC Top drive dans de différentes configurations de mât/derrick. Vous trouverez ci-dessous un petit choix d'agencements Top drive possibles [19] :

II.1.4.1. Top Drive BENTEC TD-250 C

Le Top Drive BENTEC TD-250 C possède les caractéristiques suivantes :

Capacité de levage API	250 short ton / 227 t
Pression nominale	7500 psi (517 bar)
Moteur CA, commande VFD	672 cv / 500 kW
Gamme de vitesse	0 à 100 / 200 tr/min
Couple continu	35 200 pieds - livres / 47 750 N.m
Couple de blocage / dévissage	51 500 pieds-livres / 70 000 N.m
Frein de verrouillage statique	51 500 pieds-livres / 70 000 N.m
Température ambiante	-49°F à +131°F / -45°C à +55°C

Tableau II.9- TD-250 C [19]



Figure II.12- TD-250 C [19]

II.1.4.2. Top Drive BENTEC TD-275-HT

Le Top Drive BENTEC TD-275-HT possède les caractéristiques suivantes :

Capacité de levage API	275 short ton / 250 t
Pression nominale	7500 psi (517 bar)
Moteur CA, commande VFD	672 cv / 500 kW
Gamme de vitesse	0 à 100 / 200 tr/min
Couple continu	35 200 pieds - livres / 47 750 N.m
Couple de blocage / dévissage	51 500 pieds-livres / 70 000 N.m
Frein de verrouillage statique	51 500 pieds-livres / 70 000 N.m
Température ambiante	-49°F à +131°F / -45°C à +55°C

Tableau II.10- TD-275HT [19]



Figure II.13- TD-275-HT [19]

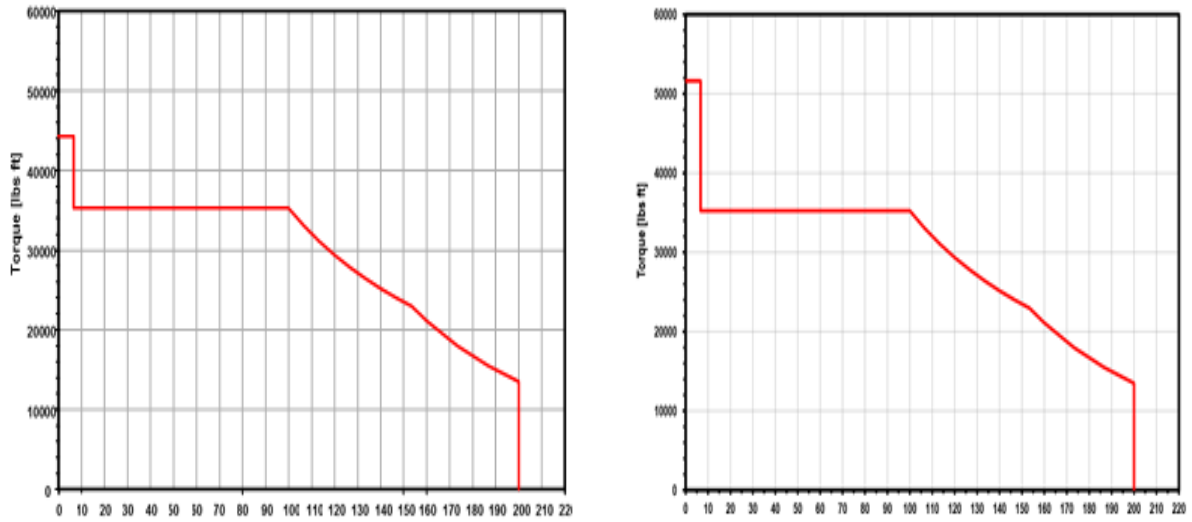


Figure II.14- Le couple en fonction de la vitesse de rotation de TD-250C, TD-275HT [19]

II.1.4.3. Top Drive BENTEC TD-350-HT

Le Top Drive BENTEC TD-350-HT possède les caractéristiques suivantes :

Capacité de levage API	350 short ton / 317 t
Pression nominale	7500 psi (517 bar)
Moteur CA, commande VFD	1030 cv / 758kW
Gamme de vitesse	0 à 115 / 230 tr/min
Couple continu	46 500 pieds - livres / 63 000 N.m
Couple de blocage / dévissage	73 760 pieds-livres / 70 000 N.m
Frein de verrouillage statique	77 440 pieds-livres / 100 000 N.m
Température ambiante	-49°F à +131°F / -45°C à +55°C



Tableau II.11- TD-350-HT [19]

Figure II.15- TD-350-HT [19]

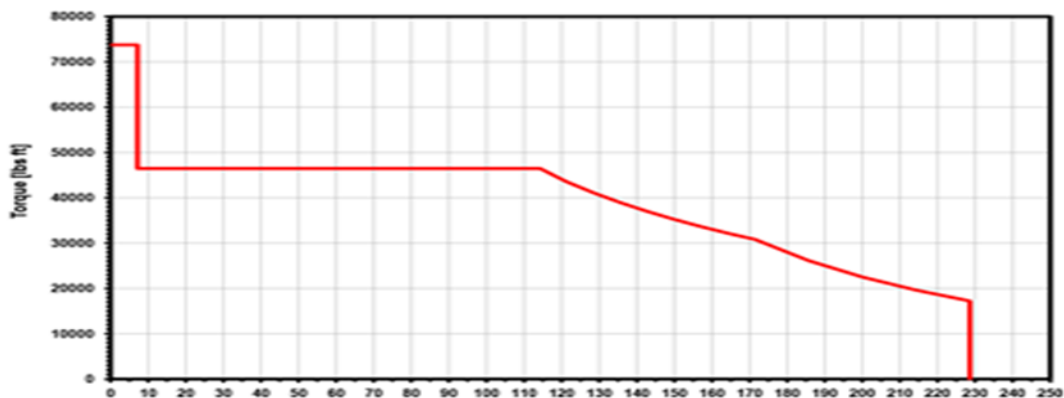


Figure II.16 – Le couple en fonction de la vitesse de rotation du TD-350-HT [19]

II.1.4.4. Top Drive BENTEC TD-500-HT

Le Top Drive BENTEC TD-500-HT possède les caractéristiques suivantes :

Capacité de levage API	350 short ton / 317 t
Pression nominale	7500 psi (517 bar)
Moteur CA, commande VFD	1030 cv / 758kW
Gamme de vitesse	0 à 115 / 230 tr/min
Couple continu	46 500 pieds - livres / 63 000 N.m
Couple de blocage / dévissage	73 760 pieds-livres / 100 000 N.m
Frein de verrouillage statique	77 440 pieds-livres / 105 000 N.m
Température ambiante	-49°F à +131°F / -45°C à +55°C



Tableau II.12- TD-500-HT [19]

Figure II.17- TD-500-HT [19]

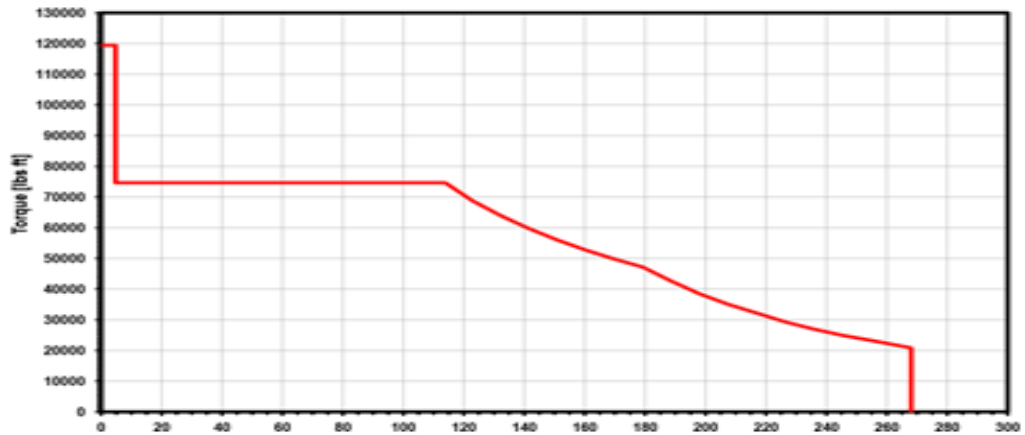


Figure II.18- Le couple en fonction de la vitesse de rotation de TD-500-HT [19]

II.1.4.5. Top Drive BENTEC TD-750-HT

Le Top Drive BENTEC TD-750-HT possède les caractéristiques suivantes :

Capacité de levage API	750 short ton / 680 t
Pression nominale	7500 psi (517 bar)
Moteur CA, commande VFD	1030 cv / 758kW
Gamme de vitesse	0 à 115 / 270 tr/min
Couple continu	73 760 pieds - livres / 100 00 N.m
Couple de blocage / dévissage	118 000 pieds-livres / 160 000 N.m
Frein de verrouillage statique	93 670 pieds-livres / 127 000 N.m
Température ambiante	-49°F à +131°F / -45°C à +55°C



Tableau II.13- TD-750-HT [19]

Figure II.19- TD-750-HT [19]

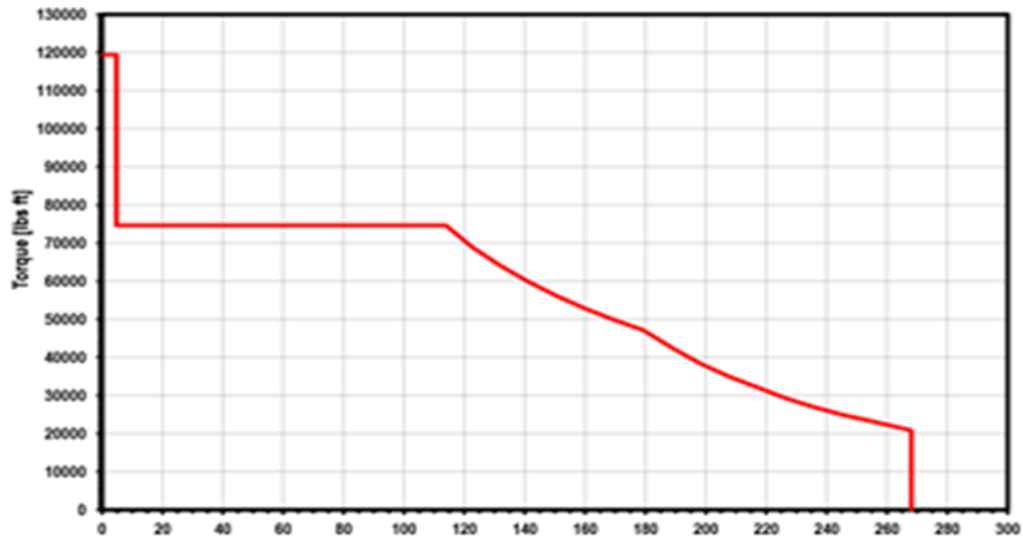


Figure II.20- Le couple en fonction de la vitesse de rotation de TD-750-HT [19]

Le BENTEC TD a été construit pour une utilisation en tant qu'unité transportable, ou installée durablement sur des installations de forage profond avec différentes versions de mât. Il est entraîné par un moteur triphasé et son utilisation est effectuée à l'aide d'une console de commande / Drillers Cabin [19].

Le BENTEC TD possède les caractéristiques suivantes : résistant aux basses températures, système de contre-balancement intégré, groupe hydraulique de bord, raccords hydrauliques libres pour consommables hydrauliques supplémentaires, grande capacité Link Tilt, saisie de position du système Link Tilt, faible émission de bruit, utilisable avec une alimentation en courant de 50 et 60 Hz [19].

Conclusion

Les Top Drives sont des machines nécessaires aujourd'hui dans le domaine du forage pétrolier, car ils ont une importance vitale et des tâches multiples (rotation, manipulation des tiges...etc.). Les Top Drives facilitent le forage rotary et le rend plus perméable quelle que soit dure les conditions ; mais un tel avantage exige que les Top Drives répondent à des exigences divers telles que : l'aptitude au travail, la qualité, la sûreté de fonctionnement qui est divisé en : Fiabilité, Maintenabilité, Conservabilité et Durabilité. Malheureusement c'est dur vu la complexité de leurs design qui accompagne la complexité de leurs tâches qui rendent leur maintenance quasiment difficile et nécessite toute une stratégie élaborée, c'est pour cela qu'on va nous consacrer dans le chapitre suivant sur la maintenance du dernier type des Top drives utilisés en Algérie (CANRIG), tout en citant leurs classifications et quelques caractéristiques essentielles.

Chapitre III

Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation

Introduction

Après avoir vu les quatre types des Top drives utilisées en l'Algérie, ce chapitre traite descriptivement les Top drives CANRIG et précisément le modèle 1050E-500, ses caractéristiques, sa partie mécanique ainsi que sa maintenance. Pour la marque CANRIG il y a naturellement toute une gamme des Top drives (4017AC, le 6027 AC, le 8050 AC, le 1235AC, le 1275 ACetc.) qui ont le même design et même construction mais juste différent du côté puissance et destination de forage c'est pour cela qu'on peut seulement étudier un seul modèle pour comprendre le côté mécanique du CANRIG.

III. Spécifications (modèle 1050E-500)

III.1.1. Désignation du modèle

- 10 : 10X10 = 1000 HP : la puissance nominale du moteur électrique.
- 50 : 50X10 = 500 tons : la capacité nominale de levage.
- E : électrique (à courant continu).
- 500 :5 :00 :1 : rapport de réduction.

III.1.2. Caractéristiques

Capacité nominale de levage statique	500 tons
Moteur	A courant continu à excitation séparée (GE 752)
Puissance de sortie Continue Intermittente	840 KW jusqu'à 1020 KW
Rapport de démultiplication	5.00 :1
Couple continu nominal	(40700 Nm) à 180 RPM
Couple intermittent nominal	(45100 Nm) à 180 RPM
Vitesse maximale nominale	(21700 Nm) à 260 RPM
Puissance des freins	40700 Nm
Couple de moteur électrique maximum	45100 Nm
Générateur du couple développe au : Vissage et Dévissage	32500 Nm et 50800 Nm
Couple maximum de vissage des connexions	77700 Nm
Couple maximum de dévissage des connexions	96000 Nm
Système de lubrification	1.5 KW, 15 l/min de débit
Poids (sans moufles)	12700 Kg
Course du quill	8'' (20cm)
Diamètre de connexion au quill	6'' 5/8 reg
Pression de circulation nominale	5000 PSI

Tableau III.1- Les caractéristiques du Top Drive CANRIG 1050E-500 [20]

III.1.3. Composition du top drive

Le Top Drive est composé de quatre parties essentielles, à savoir :

Partie électrique : c'est la partie qui fait la principale différence entre les TDs électriques. Cette partie contient un moteur électrique (à courant continu ou alternatif), et son alimentation s'effectue à partir des convertisseurs (un système à vitesse variable) [20].

Partie électronique : cette partie contient des ADAPTERS (convertisseurs analogique – numérique et vice versa), une carte mère, un microprocesseur pour la vérification des circuits et des conditions de fonctionnement, et des scanners pour le filtrage. Cette partie contient aussi des API (automates programmables industriels) qui assurent la commande (arrêt d'urgence, alarmes ...) et la protection, relit tous les capteurs, et limitent les surtensions et les intensités supérieures à l'intensité nominale du moteur [20].

Partie hydraulique : la pression est générée dans le Circuit hydraulique à l'aide de HPU (unité de puissance hydraulique), pour être distribuée aux organes à partir du manifold. Le Circuit de lubrification est indépendant la circulation d'huile est engendrée par une pompe qui aspire du gear case et refoule au bonnet [20].

Partie mécanique : c'est l'objet de notre étude, la partie mécanique comprend plusieurs organes qui fonctionnent par entraînement du moteur électrique comme l'arbre principal (quill), le bonnet, gear case, ... etc.). Toutes les rotations mécaniques [20].

III.1.4. Partie mécanique

Le Top Drive comprend essentiellement 3 unités :

III.1.4.1. Unité de forage

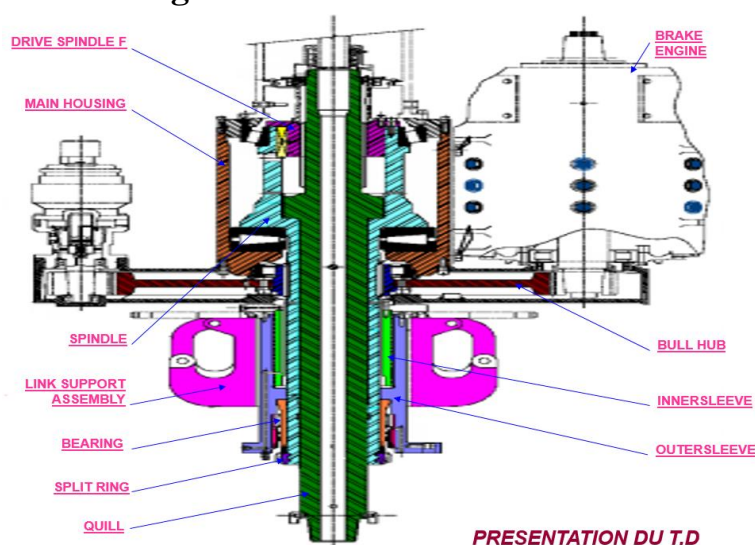


Figure III.1 – Schémas 1 du TD CANRIG [20]

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

L'unité de forage est la partie du TD responsable de fournir le mouvement et la puissance nécessaire pour forer, elle est constituée habituellement de pièces multiples assurant sa fonction. Elle est constituée du :

a. Le Bonnet (Figure III.2) : c'est une cage qui comprend le **wash pipe** avec ses deux **nuts** qui se vissent dans deux sens opposés l'un par rapport à l'autre.

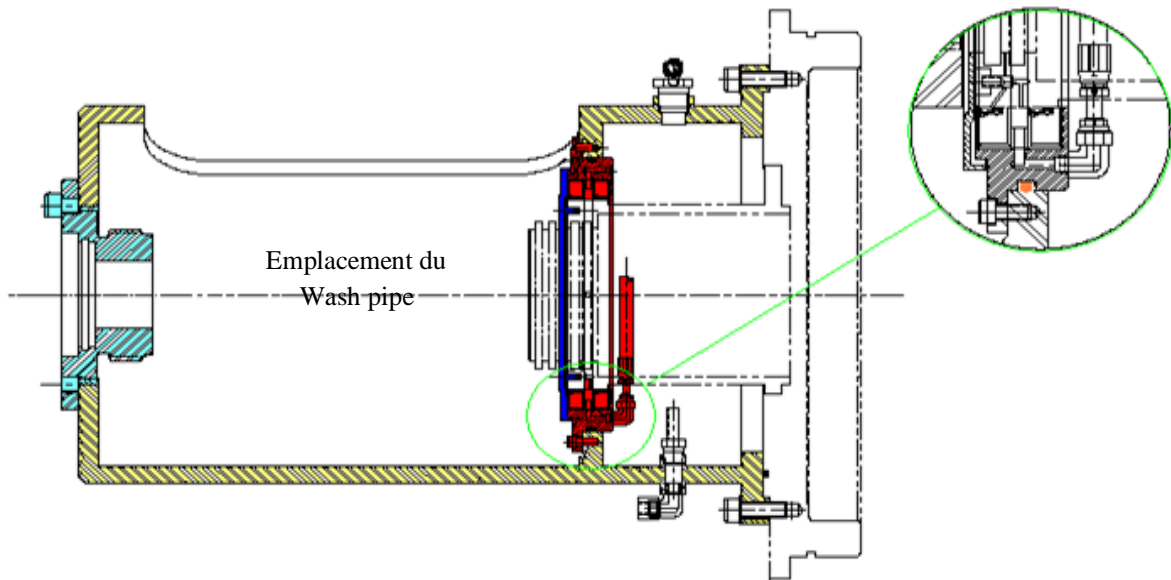


Figure III.2 – Le Bonnet [20]

b. Le Wash pipe : (Figure III.3) est un tuyau qui assure la connexion continue et l'étanchéité du flexible portant la boue de forage avec l'entrée de l'arbre principale.

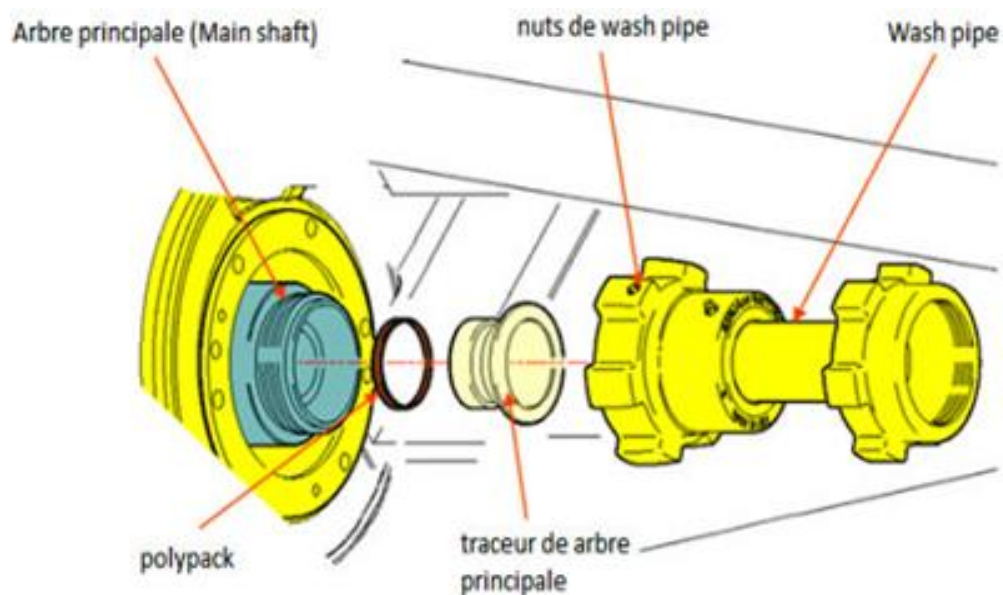


Figure III.3 – Le Washpipe

c. Le goosneck (Figure III.4) est la connexion dans laquelle est fixé le flexible provenant des pompes à boue avec le **wash pipe** du TD pour l'injection de la boue à travers le **quill**, il peut contenir une **upper well control valve** selon les besoins.

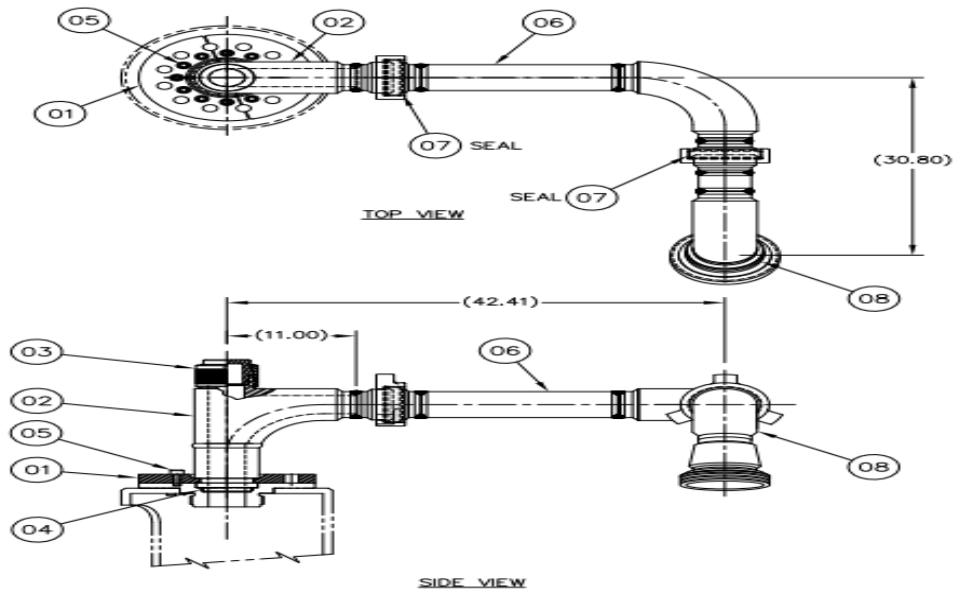


Figure III.4 – Le Goosneck [24]

d. Moteur électrique (Figure III.5) c'est l'organe qui crée la rotation du TD, il est munit d'un système de freinage, ce moteur à courant continu ou alternatif, transmet le mouvement à travers son pignon au **gear bull hub** (Figure III.6), fixée à travers son milieu avec le **spindle** (Figure III.8) engrené au moyen de la **drive spline femelle** avec le **quill** (Figure III.9) reposant aux extrémités sur deux roulements qui effectue la rotation dans le **main housing** .



Figure III.5 – Moteur d'entraînement et pignon moteur [20]



Figure III.6 – Gear bull hub [20]

e. La Gear case ou boîte de vitesse (Figure III.7) : constitue le réservoir à partir duquel aspire la pompe de lubrification pour alimenter le circuit de graissage, elle contient le **pignon moteur** (Figure III.5), le **gear bull hub**, entre eux le **gear idler** (Figure III.11) et le **torque boost pignon** (Similaire au pignon moteur).

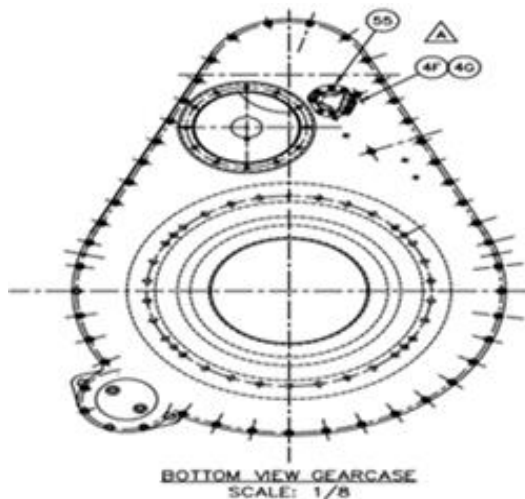


Figure III.7 – Gear case [24]



Figure III.8 – Spindle [20]

f. Le Spindle : est l'arbre fixé avec le **gear bull hub** et tourne avec lui toute en faisant tourner le **quill**, il est posé sur un palier de buté à rouleaux conique dans le **main housing**, mais la vraie utilité du **spindle** est son rôle de protection du **quill** en cas de défaillance du palier de buté, en outre terme c'est une grande pièce d'usure.

g. Le Quill (Figure III.9) : c'est l'arbre principale du TD, sous forme d'une tige il permet la circulation du fluide de forage à travers, se visse au côté supérieur avec le **wash pipe** et au côté inférieure avec les tiges de forage, possède une denture d'engrenage avec la **drive spline femelle** (Figure III.12) pour effectuer la rotation.

h. Le Main Housing (Figure III.10) : représente le socle ou la carcasse du TD dans laquelle est logé le **palier buté**, le **spindle** et le **quill**.



Figure III.9 – Quill [20]



Figure III.10 – Main housing [20]

i. Le Gear idler (Figure III.11) : est un pignon qui se situe entre le **gear bull hub** et le **pignon moteur**, sa fonction principale est inverser le sens de rotation.

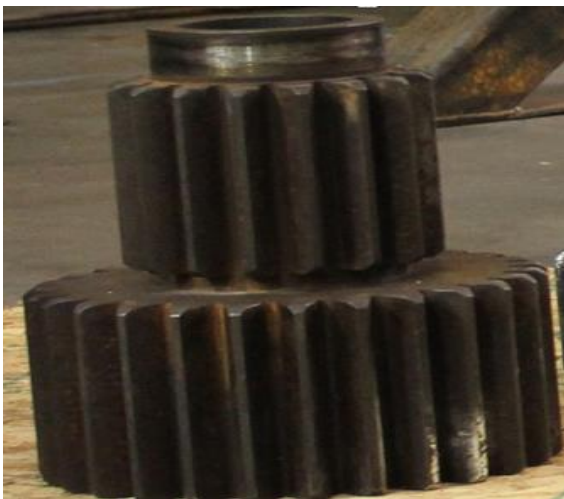


Figure III.11 – Gear idler

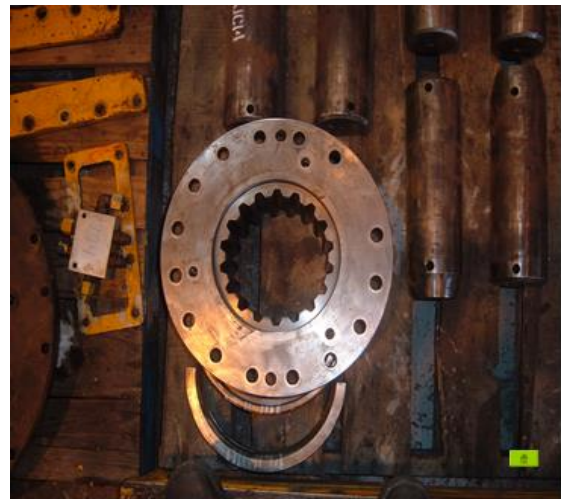


Figure III.12 – Female Drive Spline [20]

j. Le Torque Boost (Figure III.13) fonctionnant hydrauliquement il est l'augmentateur du couple à une valeur constante de vissage et de dévissage.

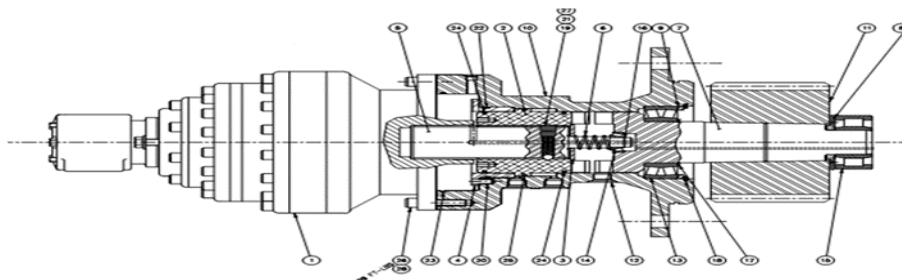


Figure III.13 – Torque boost [24]

k. Le système de freinage hydraulique (Figure III.1) : situé à la tête du moteur est constitué d'un disque de freinage fixé avec l'extension de l'arbre principale du moteur par deux boulons et cinq freins hydrauliques fixé sur le corps du moteur.

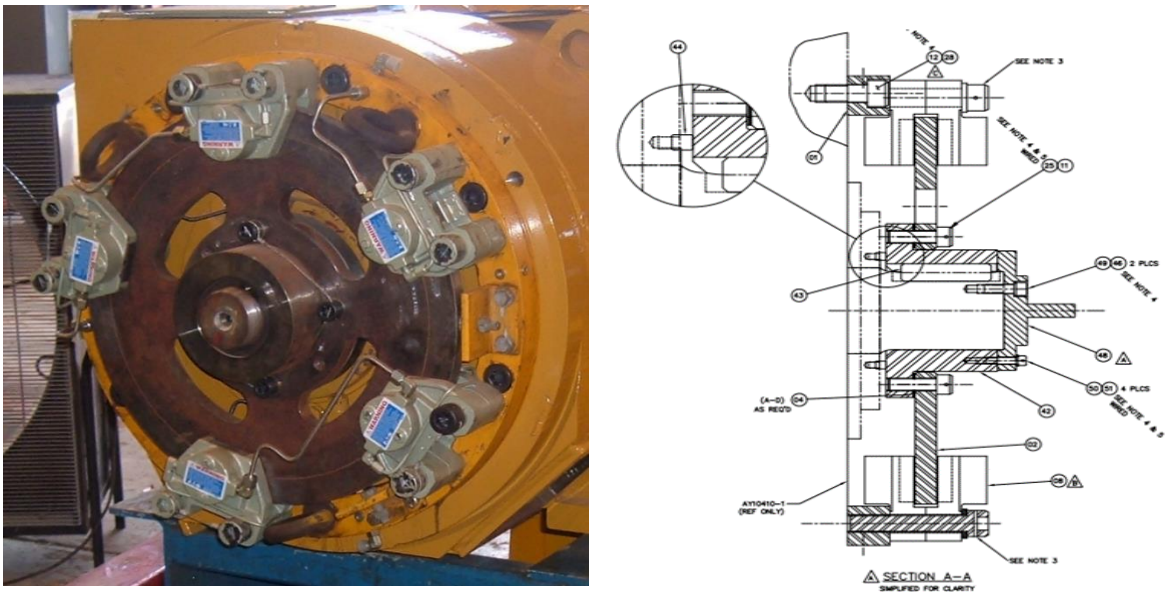


Figure III.14 – Assemblage freins [22]

III.1.4.2. Unité de manipulation des tiges

a. Le Rotary Manifold (Figure III.14) : effectue une rotation de 360° afin d'exécuter les différentes manœuvres sur le planché, il est fixé sous la **gear case** à l'aide du **goofy plate** (Figure III.14) et au niveau du **spindle** à l'aide de l'**inner race** (Figure III.16) qui permet la super position du **outer sleeve** (Figure III.15) sur elle, le **split rings** (Figure III.15) logés dans l'**inner sleeve** (Figure III.15) qui coïncident avec les **rings** internes de l'**outer sleeve**. La rotation est assurée par un moteur hydraulique fixé sur le **goofy plate** et permet de transmettre le mouvement au **gear handler** (Figure III.14).

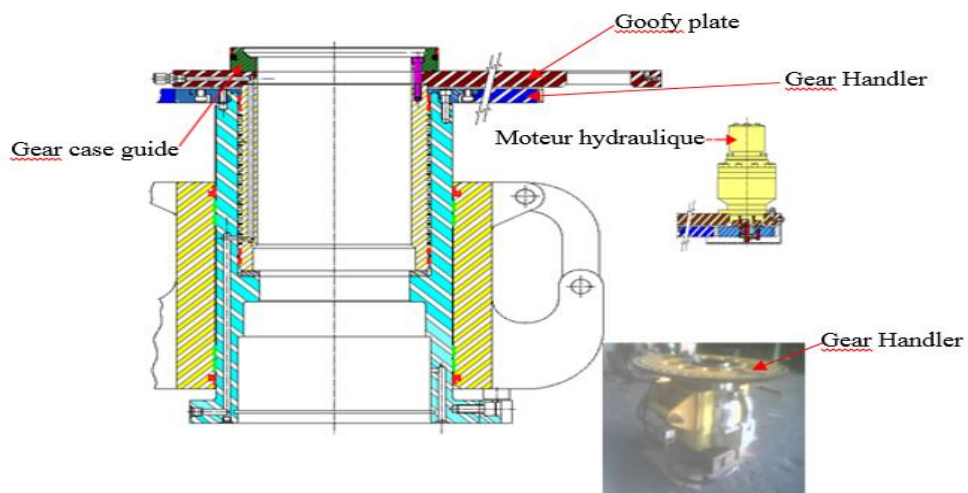


Figure III.15 – Le Rotary Manifold [20]

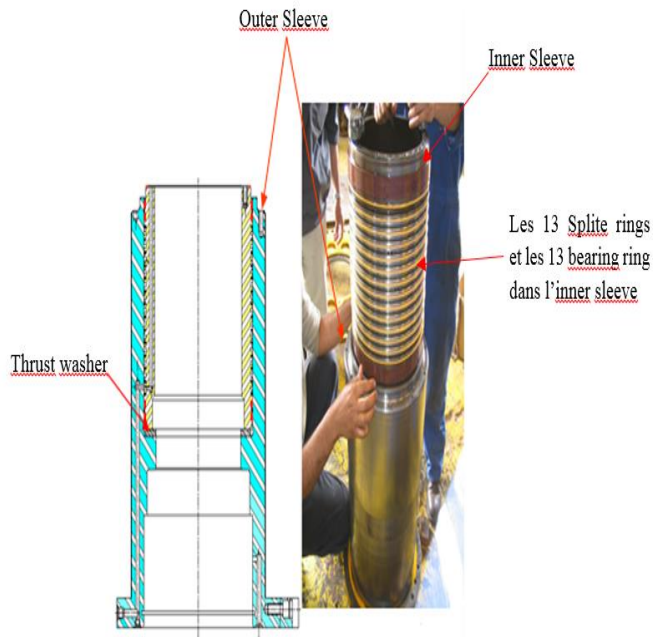


Figure III.16 – Inner and Outer Sleeve [20]



Figure III.17 – Inner Race [20]

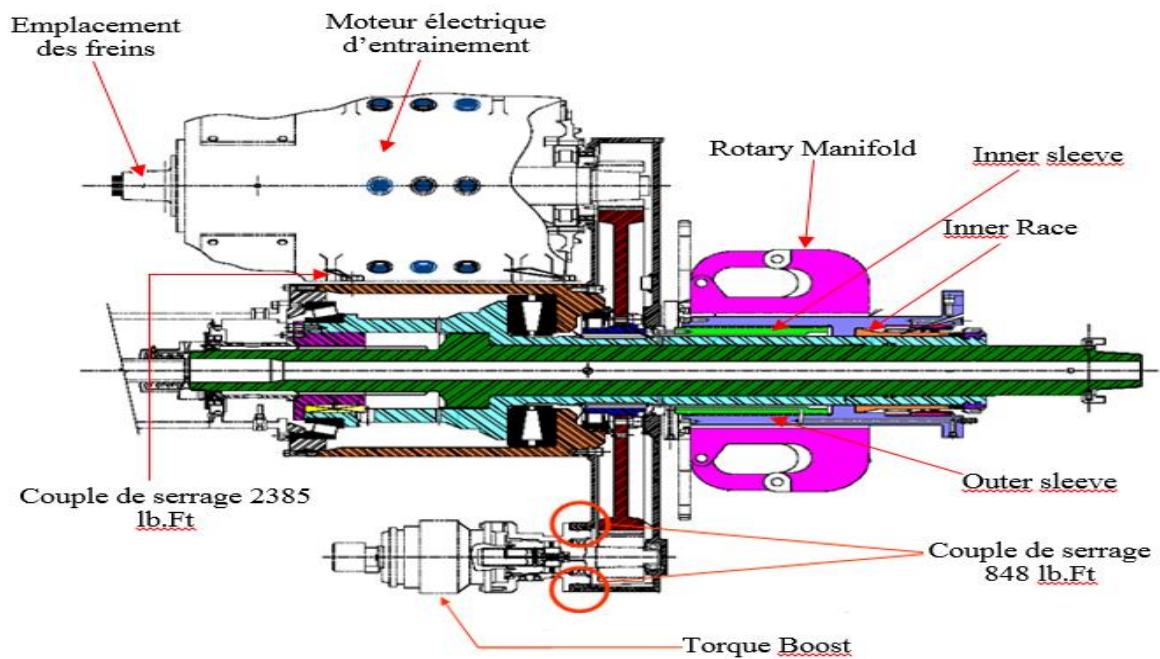


Figure III.18 – Schémas 2 du TD CANRIG [20]

b. Le Link Support (Figure III.18) : monté avec le **rotary manifold** a pour but de suspendre au moyen des **lugs** (Figure III.18), les oreilles du **l'élevateur Link** (Figure III.19) avec lequel on manipule les tiges de forage.

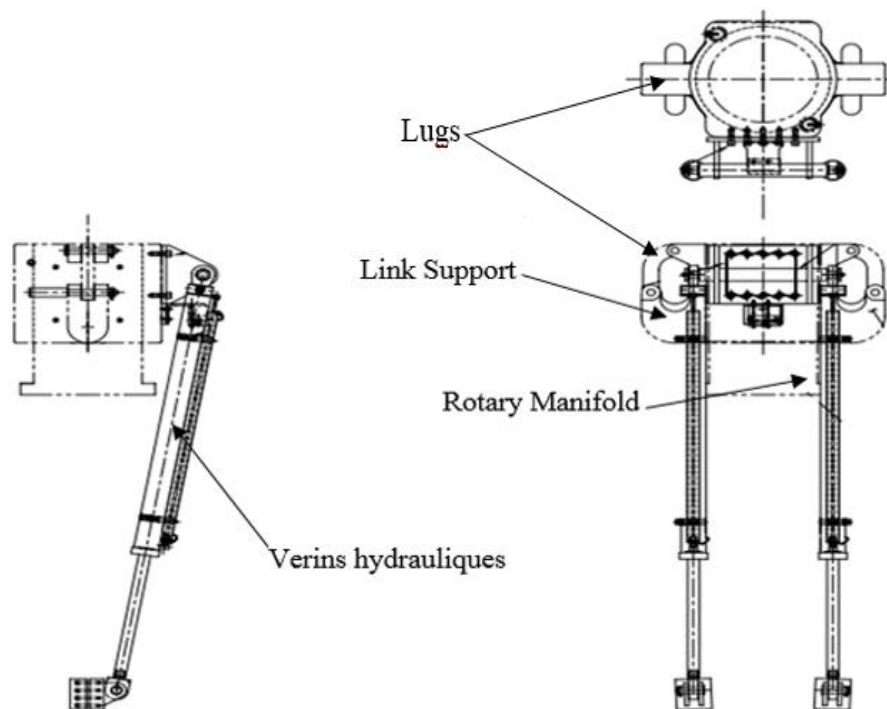


Figure III.19 – Link Support [21]

c. L'Élévateur Link (Figure III.19) : est composé de deux **tiges oreilles** (Figure III.19), deux **vérins hydrauliques** et un **gripper** (Figure III.20).

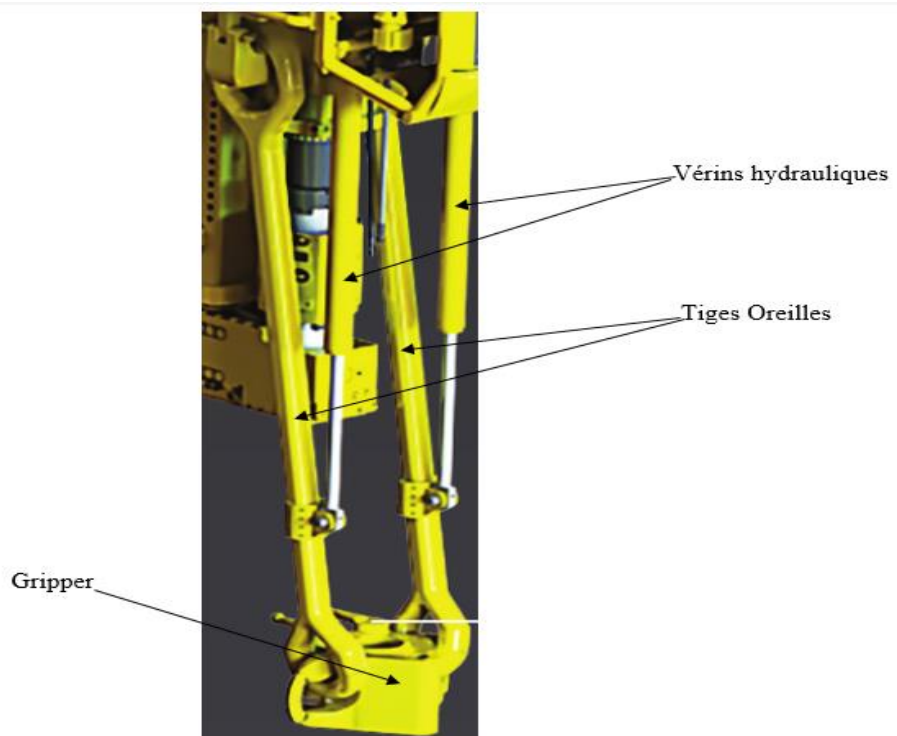


Figure III.20 – Link Support avec Gripper [26]

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

d. Les Vérins (Figure III.20) : assurent le mouvement lors de la manipulation des tiges de forages, ils s'actionnent grâce à un fluide actionneur généralement l'huile.

e. Le Gripper (Figure III.20) : est responsable a la saisi des tiges de forage afin de les soulever ou les poser.

f. Le Back-up wrench (Figure III.21) : est un dispositif dans l'unité de manipulation des tiges, il comprend un dispositif de préhension utilisable pour saisir une extrémité d'une tige de forage afin de la visser ou la dévisser de l'arbre principale du TD, il contient au moins un fluide actionneur utilisable pour compenser axialement le déplacement du fil pendant les opérations de vissage ou dévissage. Le **back-up wrench** est placé juste sous la **gear case** au côté du rotary manifold (Figure III.22) et tourne comme lui en 360° et son but principale est de neutraliser les moments d'inertie lors du forage ou les manipulations des tiges.

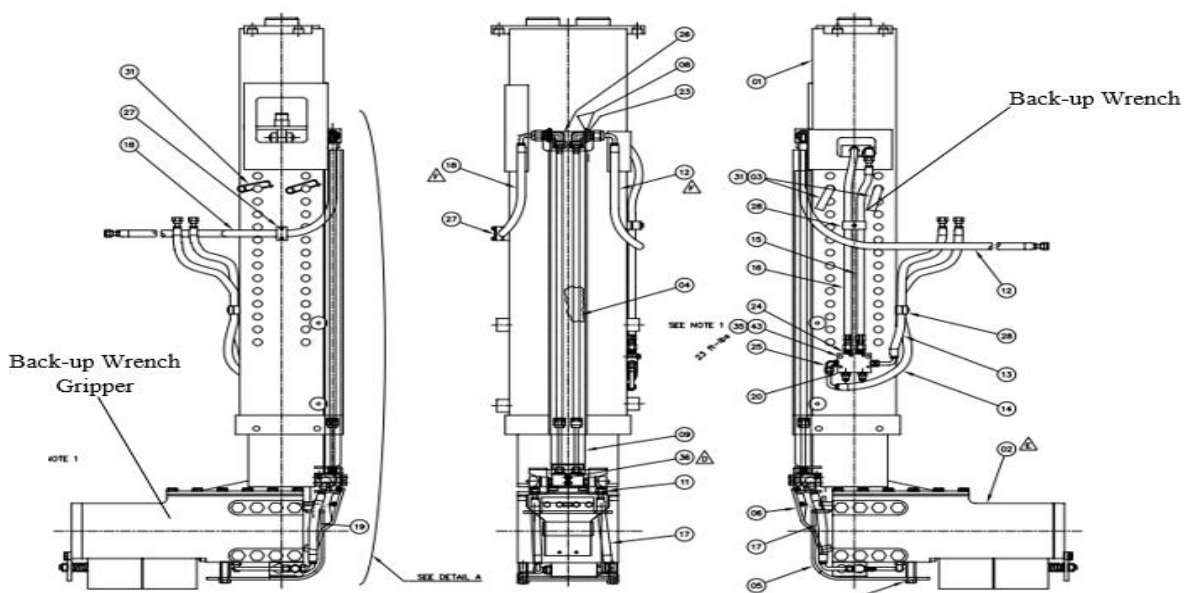


Figure III.21 – Back-up Wrench [21]

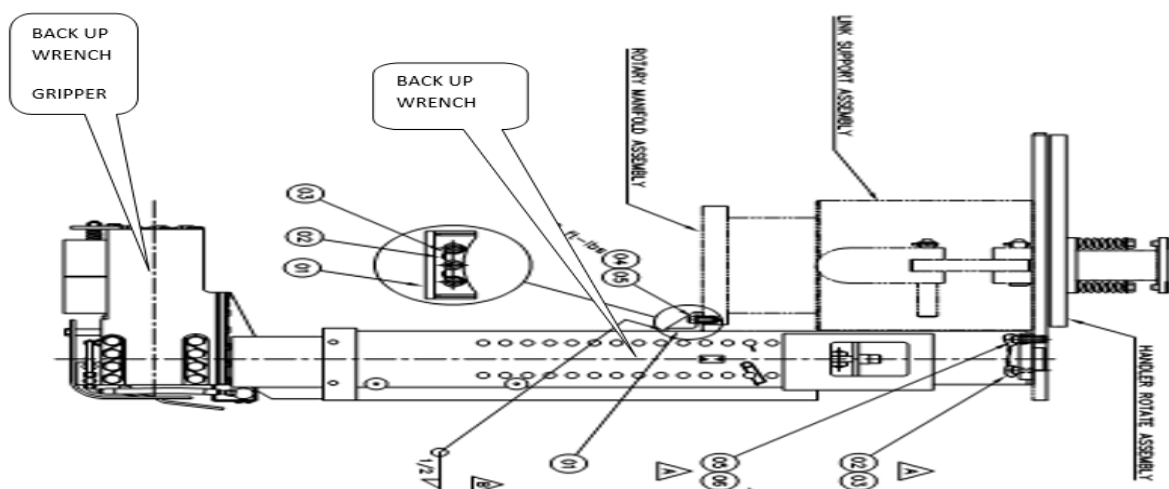


Figure III.22 – Ensemble Back-up Wrench et le Rotary Manifold [21]

g. L'actuator (Figure III.22) : elle a pour but de fermer et ouvrir la conduite dans laquelle le fluide de forage circule, elle se ferme automatiquement grâce à un système de deux vérins hydraulique qui translatent en traînant deux crémaillères respectivement fixés sur deux socles différents, ce qui fait tourner un pignon actuateur et avec sa rotation s'ouvre ou se ferme la vanne à l'intérieure de la conduite.

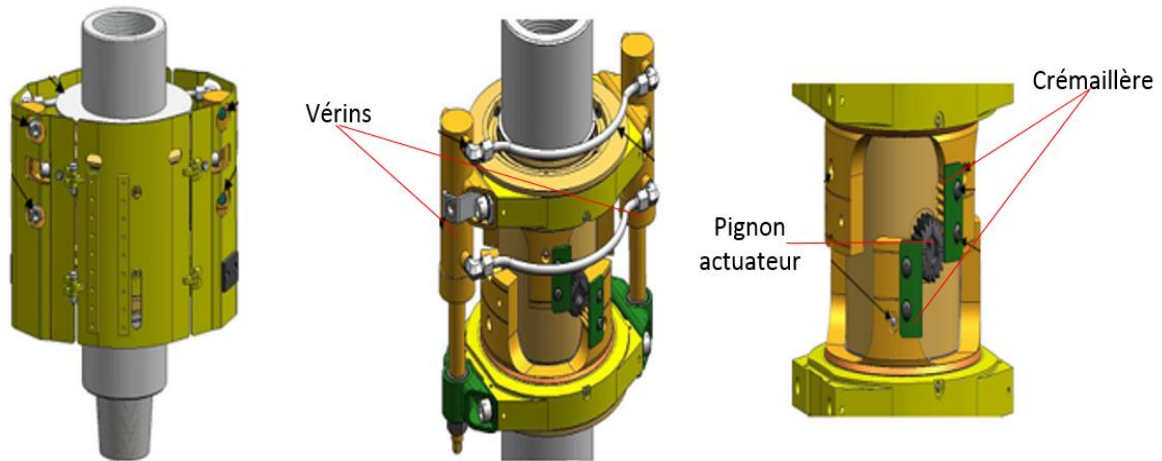


Figure III.23 – Actuator [23]

III.1.4.3. Unité de suspension

La TD est soulevé par des **upper links** (Figure III.23) fixé au moufle mobile à travers un **bail** et glisse sur le **torque guide** entre deux guides **runners** avec jeu est de 1/8". L'ensemble (Top Drive et torque guide) est suspendu au **crown bloc** avec le **hanger assy** comportant le **harpoon**, **pins**, **plates**. Les deux **tensionning cables** (Figure III.24) assurent l'alignement des cinq sections du **torque guide** en agissant sur les deux vérins.

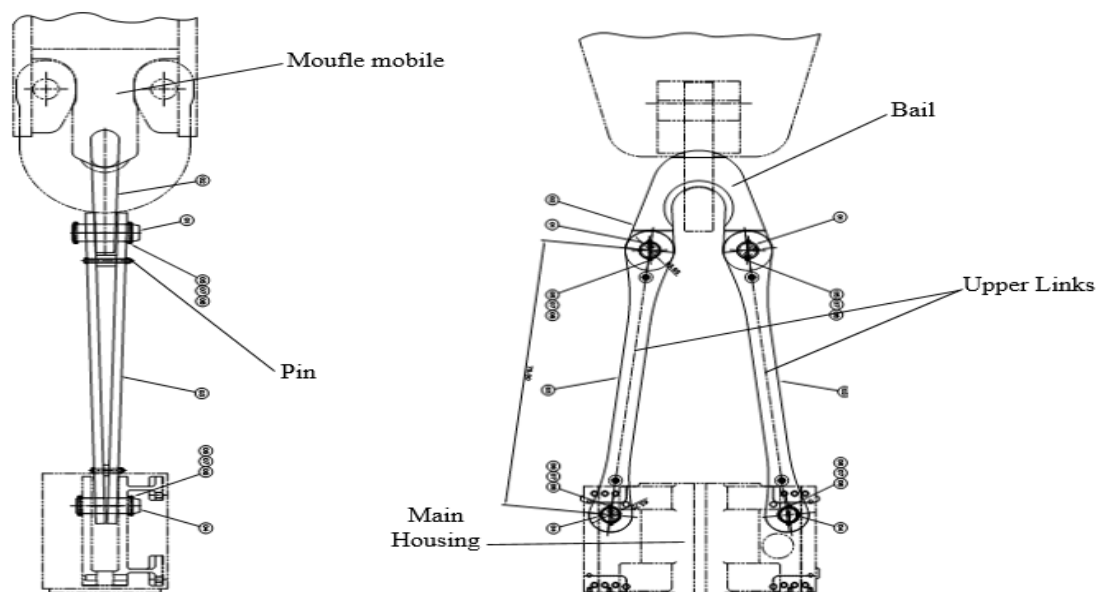


Figure III.24 – Assemblage de suspension [24]

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

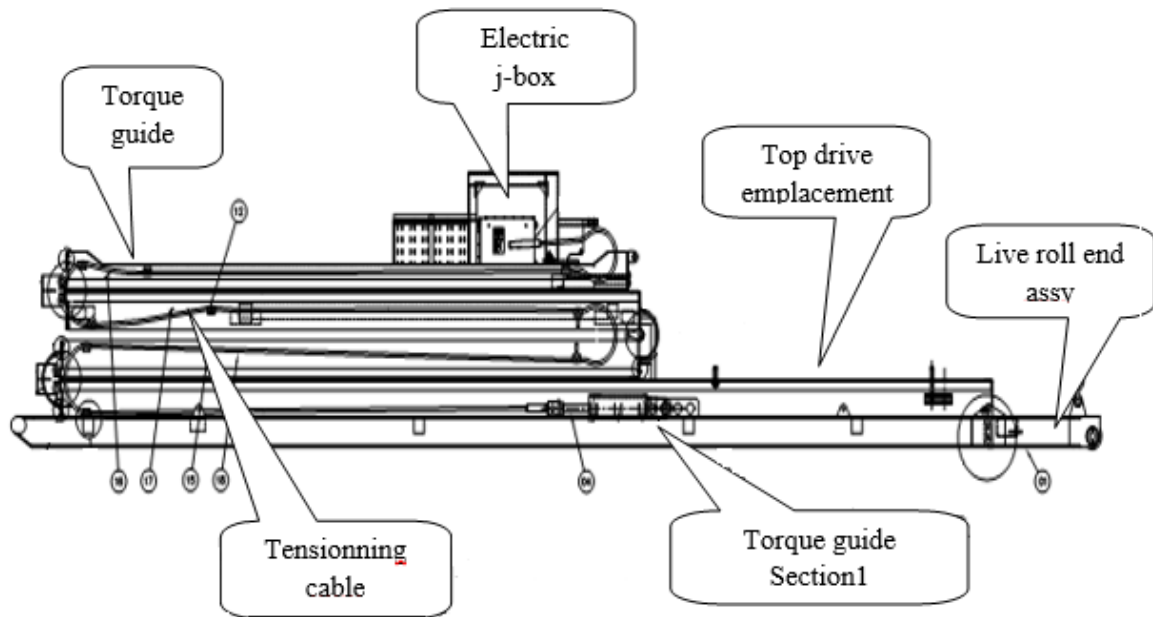


Figure III.25 – Assemblage de suspension 2 [20]

III.2. Maintenance du CANRIG 1050E-500

La maintenance d'une Top Drive est toute une stratégie élaborée par la compagnie mais en cite juste les tâches appliquées au TD 1050 E-500 suivant la politique de l'ENTP.

III.2.1. Tâches de maintenance appliquées au TD 1050E-500

Le premier de ces tâches est :

III.2.1.1. Graissage

Pour le graissage on utilise la graisse universelle au lithium aux points suivants (en gris) :

ENTP DMP SGMAO	PLAN DE MAINTENANCE PREVENTIVE SYSTEMATIQUE			Page 1/2
	Équipement : TOP DRIVE DE MARQUE CANRIG type 1050E-500			Date d'effet :
	Type du compteur du plan de maintenance : calendrier			Indice : 0/0
		Pièces de rechange et consommable		
FREQUENCE		DESIGNATION	QTE	CODE ENTP
Chaque jour	Contrôle d'entretien :			
	1- Graisser la garniture du tube d'usure (Tous les 12 h)	Graisse		2406000021
	2- Graisser la bague d'étanchéité supérieure (Tous les 12 h)	Graisse		2406000021
	3- Graisser la soupape d'armoie à boue (Tous les 12h)	Graisse		2406000021
	4- Graisser la commande de la LWCV	Graisse		2406000021
	5- Graisser les bagues de vérin du dispositif d'inclinaison des bras	Graisse		2406000021
	6- Contrôler l'indicateur sur le filtre hydraulique (Changer le filtre si l'indicateur est ROUGE)			
	7- Contrôler l'indicateur sur le filtre de lubrification			
	8- Contrôler le niveau d'huile de la boîte d'engrenage de l'entraînement supérieur			
	9- Vérifier le serrage de l'entraînement supérieur des raccords hydrauliques (Éliminer toutes les fuites)			
	10- Vérifier le serrage des boulons de l'entraînement supérieur			
11- Contrôler le niveau du fluide des commandes de frein				
Contrôle de l'Unité de puissance hydraulique				
1- Contrôler le niveau dans le réservoir et faire l'appoint jusqu'au niveau requis	TISKA 32		245033415	
2- Contrôler l'indicateur sur le filtre à pression (Changer le filtre si l'indicateur est ROUGE)				
3- Contrôler l'indicateur sur le filtre de retour (Changer le filtre si l'indicateur est ROUGE)				

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

Chaque semaine	1-Effectuer les opérations de la fréquence précédente (chaque jour)			
	2- Graisser le support d'articulation	Graisse		2406000021
	3- Graisser les tubes principaux de BUW (Clé de dévissage)			
	4- Graisser le cylindre de la machoire du BUW (Clé de dévissage)			
	5- Graisser les joints hydrauliques articulés de la machoire du BUW (Clé de dévissage)			
	6- Graisser la manette de blocage			
	7- Contrôler et nettoyer la crépine d'aspiration de l'huile de lubrification			
	8- Contrôler le reniflard de la boîte d'engrenage			
	9- Contrôler l'usure des patins de frein et procéder à un test de fonctionnement en même temps			
	1-Effectuer les opérations de la fréquence précédente (chaque semaine)			
	2- Contrôler le niveau d'huile de la boîte d'engrenage du booster du couple et faire l'appoint jusqu'au	TISKA 32		245033415
	3- Inspecter les balais du moteur DCC			
	4-Graisser la pompe à l'huile de lubrification	Graisse		2406000021
	5- Contrôler et nettoyer les écrans des pares-étincelles			

Tableau III.2 –Plans de maintenance systématique de l'ENTP du 1050E-500 [25]

III.2.1.2. Inspection chaque 700 heures

1- Enlever le raccord d'usure et la soupape de contrôle de puits inférieure (LWCV) et examiner les connexions (y compris l'arbre principal) en utilisant les techniques des particules magnétiques.

2- Procéder à un test de pression sur le chemin de circulation entre le raccord d'usure et la soupape de contrôle de puits supérieure (UWCV) à 200 psi et 500 psi.

3- Inspecter visuellement le système de levage : Anse, Articulations supérieures, Support d'articulation supérieure, corps principal, Manchon extérieur du manifold de rotation, Bras d'élèveur, Élévateurs.

4- Vérifier visuellement le serrage des boulons du top drive.

III.2.1.3. Inspection chaque 4000 heures

1- Vidanger la boîte d'engrenage

Si l'huile de lubrification devient contaminée par la boue ou l'eau, ce qui causerait la défaillance rapide des bagues des roulements, il convient de la vidanger même si l'intervalle prévu n'est pas atteint, rincer la boîte d'engrenage et changer l'huile.

2- Vérifier le jeu des bagues des roulements du top drive et placer de nouvelles cales si nécessaires en suivant ces étapes :

A- Enlever le tube d'usure.

B- Placer la base d'un comparateur à cadran sur le haut du porte-joints supérieur (ou côté bonnet) et le piston sur le haut de la bague d'étanchéité supérieure.

C- Charger l'extrémité de l'arbre principal contre le haut et le bas de sa course libre. (REMARQUE : Course de l'arbre principal = 20 cm)

D- Lire le jeu axial indiqué sur l'écran (Jeu axial désiré = 0.002/0.004")

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

E- Pour ajuster ce jeu axial, ajouter ou enlever des cales entre le siège de bague du roulement et le corps principal.

F-Sortir le moteur électrique et vérifier l'état des joints étanches inférieurs de l'arbre puis changer les joints étanches si nécessaire et vérifier que l'espace entre les joints est rempli de graisse.

III.2.1.4. Inspection interne

L'inspection principale suivante est recommandée tous les 1000 jours de service [20] :

1- Démonter le top drive.

2- Inspecter toutes les pièces de la voie de contrainte de levage par les techniques des particules magnétiques :

L'arbre principal, le pivot de rotation, la bague intérieure, les bras d'élévateur, l'élévateurs, le support d'articulation supérieure, le manchon extérieur de manifold de rotation, le corps principal, l'anse, les axes d'articulation supérieure.

3- Vérifier tous les paliers, joints étanches, surfaces de roulement des paliers, engrenages et accouplements. Remettre en état selon le besoin.

III.2.1.5. Inspection suivant chaque déplacement de l'unité de forage

1- Vérifier visuellement l'intégrité de tous les tendeurs, goupilles, manchons sphériques et boulons de raccordement à bride du guide de couple.

2- Vérifier le serrage des boulons et le montage du ventilateur, des chemins de câbles et des tubes hydrauliques.

III.2.1.6. Inspection suivant des périodes de forage sévères

Par suite de période de forage sévère, particulièrement pour des forages de surface, un desserrement de divers éléments du top drive peut se produire, dû aux vibrations. Les contrôles suivants sont recommandés dans ces cas [20] :

1- Procéder à un examen visuel en s'efforçant de détecter tous signes d'endommagement.

2- Inspecter visuellement la tuyauterie d'admission de boue.

3- Vérifier les écrous câblés au niveau des avaries ou de fil cassé. Si des fils cassés sont découverts, vérifier le serrage des boulons affectés et recâbler. Se référer aux Valeurs de couple des vis à tête. Changer les fils endommagés.

4- Vérifier le serrage de tous les boulons extérieurs qui ne sont pas câblés.

5- Vérifier le serrage de toutes les protections, les événements (canal d'aération) et couvercles.

6- Vérifier que tous les câbles de sécurité sont bien fixés correctement.

7- Examiner visuellement l'intérieur des boîtes de branchement pour s'assurer qu'aucune pièce n'est desserrée.

III.2.1.7. Inspection du tube d'usure

1-Fixer la base d'un indicateur magnétique sur le manchon ou le presse-étoupe.

2-Tourner le manchon de 360° et noter l'indication totale de l'indicateur en positions A, B,C.

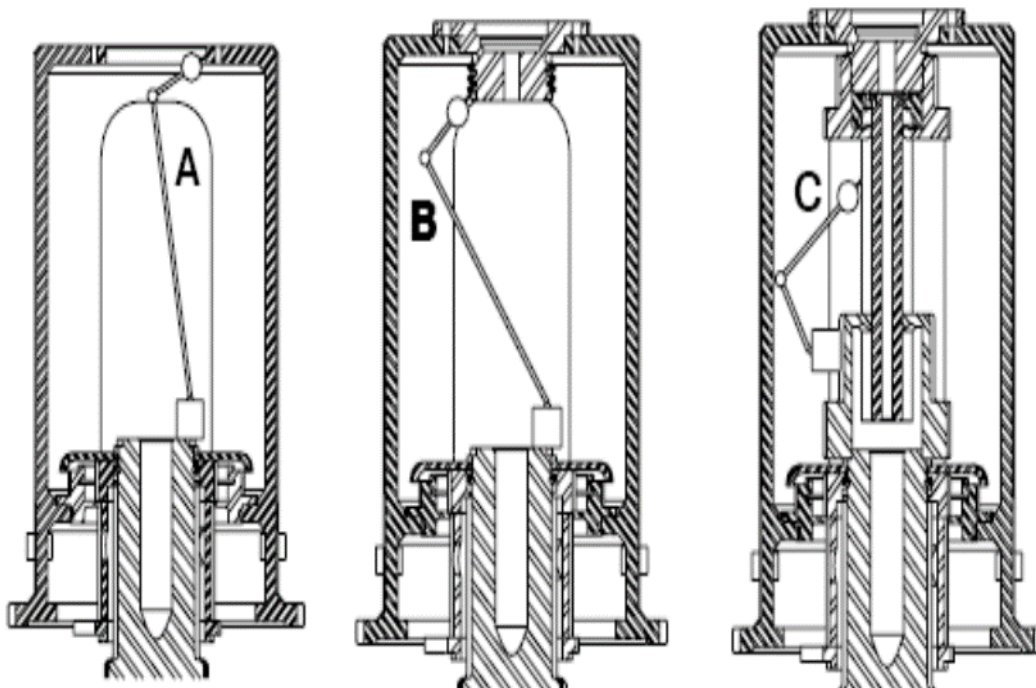


Figure III.26 – Inspection du tube d'usure [20]

III.2.1.8. Tolérances recommandées

A : Désalignement maximum admissible à l'alésage du support de col de cygne = 0.008"

B : Désalignement maximum admissible au pilote de col de cygne = 0.010"

C : Désalignement maximum admissible du tube d'usure à la fin du montage = 0.010"

L'inspection peut indiquer un désalignement qui dépasse les limites recommandées. Les ensembles de garniture de tube d'usure sont conçus pour permettre des désalignements entre manchon et col de cygne et fonctionneront avec certains désalignements excessifs [20].

Cependant, pour obtenir le maximum de vie de la garniture, l'alignement au tube d'usure doit être conservé dans les limites recommandées.

III.2.1.9. Inspection du frein à disque

L'inspection s'effectue comme suit :

a. Contrôle du fluide

Le réservoir de fluide de frein doit faire l'objet d'un contrôle visuel quotidien.

Une chute brusque du niveau de l'huile peut indiquer l'usure des éléments. Veiller à utiliser une huile à base minérale (huile hydraulique par exemple) pour le système de freinage.

b. Contrôle des étriers du frein

- Les **étriers** du frein doivent être vérifiés hebdomadairement.
- Procéder à un test de fonctionnement en même temps.
- Il doit exister un écart minimum de 0,06'' entre les patins et le disque du frein.
- En plus de l'usure prématurée, des patins de frein traînants peuvent aussi causer une surchauffe dans le compartiment des freins.
- En cas de patins de freins traînants, le système peut devoir être purgé pour éliminer toute poche d'air.

c. Purge manuelle des freins

- 1- Purger d'abord l'actionneur de freinage, puis les étriers.
- 2- Nettoyer la zone autour des deux couvercles de réservoir.
- 3- Enlever les couvercles.
- 4- Remplir les réservoirs jusqu'au niveau PLEIN. Remettre les couvercles sur les réservoirs mais sans les serrer.
- 5- Placer le commutateur du top drive en position AUX et démarrer la HPU (Unité de puissance hydraulique).
- 6- Faire passer les freins par plusieurs cycles en actionnant l'interrupteur de freinage sur le pupitre de commande.
- 7- Le freinage étant appliqué et HPU en marche, desserrer la vis de purge sur l'élément jusqu'au moment où il n'existe aucune indication d'air mélangé à l'huile.
- 8- Fermer la vis de purge.
- 9- Faire passer le frein par le cycle Marche et Arrêt.

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

10- Répéter jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'air visible dans le système.

11- Remplir les réservoirs au niveau Plein et serrer les couvercles.

La **Gear Case** du Top Drive CANRIG 1050E-500 et en étant le réservoir où stocker l'huile utilisé pour la lubrification, le refroidissement où le chauffage de plus les actions et le mouvement des vérins, le **torque boost** et le **handler rotate**, peut contenir jusqu'à 38 Litre qui circulent à travers le TD suivant un réseau complexe simplifié ci-dessous :

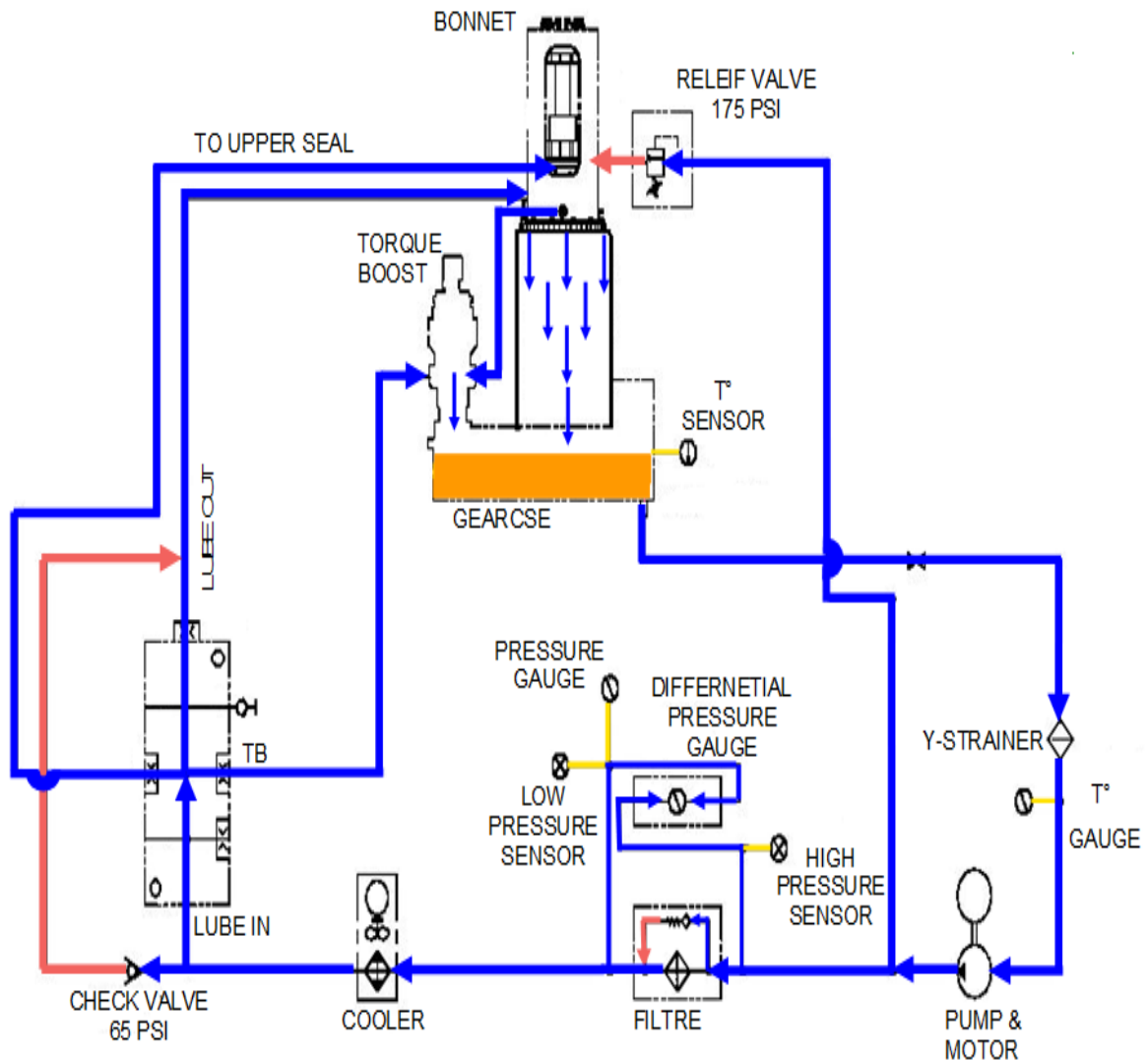


Figure III.27 – Schéma du circuit de lubrification [20]

Donc l'huile circule dans toute la TD et spécialement à travers les éléments dynamiques pour les lubrifier et ajuster leurs températures selon l'idéale, car ses éléments ont plus de tendance à subir des contraintes diverses et fatales parfois, ce qui provoque leur défaillance plus rapidement que prévue. Parmi ces éléments il y a la butée.

III.2.2. Description de la butée

La butée en mécanique est une sorte de roulement mais destinée à supporter des charges axiales hyper importantes, elle est utilisée comme un palier là où les forces axiales nécessitent une robustesse dans la structure pour pouvoir supporter et assurer la rotation du système en même temps.

La **BFS-8033** (Figure III.28) est une butée avec rouleaux coniques, deux anneaux un supérieur et un inférieur qui représentent la piste dans les quelles roulent les rouleaux et une cage pour maintenir ces éléments.



Figure III.28-Butée BFS-8033 [28]

III.2.2.1. Utilisation dans le domaine de forage des puits

La butée BFS-8033 occupe un rôle critique, elle représente le cœur du Top Drive et le pallier qui supporte des charges axiales importantes causées par le poids du train de sonde tout en assurant la rotation pour forer, c'est pour cela qu'elle est très recommandée dans le marché et elle est onéreuse de façon qu'elle coûte 62286,35 dollars [38]. Pour notre TD 1050 E-500 la BFS-8033 se situe dans le **main housing** au-dessous du **spindle** qui représente son alésage comme c'est présentée dans la figure III.29.



Figure III.29 – Butée dans le main housing

III.3. Problématique

Donc la butée a besoin d'être prise en considération de la part des maintenanciers ce qui n'est pas toujours le cas et ça mène à des complications graves en cas de sa défaillance, comme la panne permanente du Top Drive, l'arrêt immédiat du processus de forage donc pertes de production et peut être des effets sur la sécurité du personnel.

Les erreurs qui causent ses accidents sont nombreuses mais essentiellement humaines qui résultent parfois d'une négligence, mauvaise décision de maintenance ou une fausse manipulation lors du forage, mais quel que soit la cause il aura toujours des pertes de production ou de matériels. L'ENAFOR a marqué une défaillance dans le **Top Drive CANRIG** à cause d'une défaillance brutale dans sa butée et donc une panne critique du Top Drive qui coûte les milliards, la figure III.30 représente la butée défaillante (extrait du bulletin de sensibilisation).

La butée subit une lubrification d'huile qui circule dans le réseau hydraulique du Top Drive et passe dans le **main housing** afin de lubrifier le **spindle**, le **quill** et la butée mais un graissage programmé pour la butée est nécessaire et en cas de manque de graissage une défaillance est fortement probable, c'est pour ça qu'aucune négligence et tolérée.



Figure III.30 – Butée complètement défaillante [27]

Donc c'est extrêmement nécessaire de trouver une solution à ce problème et c'est exactement le but de ce travail de mémoire mais, pour le faire on a besoin d'abord d'étudier la **BFS-8033**.

III.3.1. Etude de la butée

Afin d'étudier cette butée, nous avons naturellement besoin de connaître plusieurs dimensions et informations sur elle, on a besoin aussi des données de sa défaillance issue de l'entreprise fabricante, ce qui est pratiquement très difficile voire impossible, car cette pièce

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

est utilisée formellement dans un domaine sensible (domaine pétrolier), et toute information critique sur elle est classifiée.

Donc, pour avoir des données utiles sur la butée, on va travailler sur un logiciel qui est le **Matlab Simulink 2020**, afin de simuler sous différentes conditions le comportement de cette dernière. La réponse de la simulation est donnée sous forme de graphes de vibration.

III.3.2. Calcul de la butée

La BFS-8033 possède une géométrie complexe par rapport aux autres butées ce qui la rend difficile pour simuler.

III.3.2.1. Dimensions de la butée

La butée **BFS-8033** (selon **SKF**) ou **T1120** (selon **Timken**) a les dimensions suivantes :

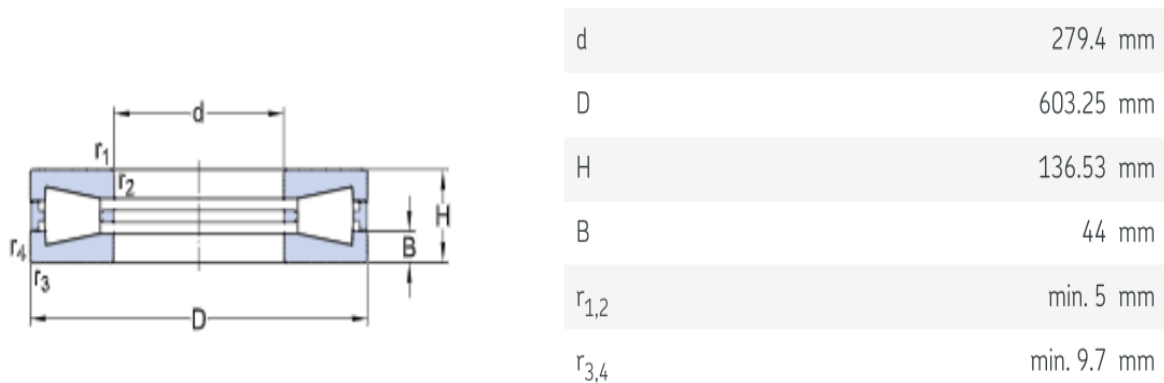


Figure III.31- Dimensions de la **BFS-8033** [28]

III.3.2.2. Dimensions de l'élément roulant

Pour calculer les dimensions de l'élément roulant on va utiliser les formules suivantes :

$$D_{min} = H - 2 \cdot B = 48,53 \text{ mm} \quad (\text{III.1})$$

$$D_{max} = D_{min} + 2 \cdot \left(\frac{B}{2} - 2.0435 \right) = 88,443 \text{ mm} \quad (\text{III.2})$$

$$L = \left(\frac{D_{max} - D_{min}}{2} \right) - 2,22 = 117,925 \text{ mm} \quad (\text{III.3})$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{22 - 2.0435}{117,925} \right) = 9,605^\circ \quad (\text{III.4})$$

D_{min} : Le diamètre minimum du rouleau.

D_{max} : Le diamètre maximum du rouleau.

L : La distance perpendiculaire entre le D_{min} et D_{max} .

α : L'angle de contact et l'angle d'inclinaison du rouleau.

III.3.2.3. Masse de l'élément roulant

Pour pouvoir calculer la masse du rouleau il faut connaître son volume et sa masse volumique, pour connaître le volume il est plus facile de dessiner le rouleau dans un logiciel de CAO comme le **Solidworks** et obtenir directement le volume et la masse. Par manque de données sur la masse volumique du matériau (secret du fabricant) et donc en vas juste utiliser l'acier **X105CrMo17 (AISI 440C)** car il est utilisé en générales pour la fabrication des roulements, dont sa masse volumique [39], qui est :

$$\rho_r = 7650 \frac{Kg}{m^3}$$

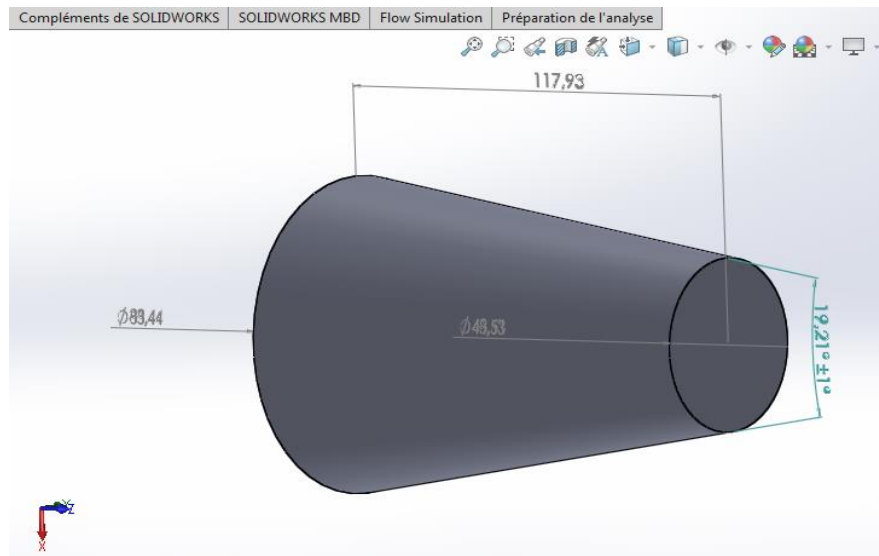


Figure III.32 - Dimension du rouleau conique

D'après les résultats du **SolidWorks** :

$$V_r = 4,44672 \cdot 10^{-4} m^3$$

$$m_r = \rho_r \cdot V_r = 3,4174 Kg \quad (3.5)$$

III.3.2.4. Masse des bagues et de la cage

$$m_{a,c} = m_b - Z \cdot m_r = 147,321 Kg \quad (3.6)$$

$Z = 16$: Le nombre des rouleaux dans la butée.

$m_b = 202 Kg$: Masse de la butée.

III.3.2.5. Charge appliquée sur la butée

En réalité la charge appliquée sur la butée varie avec les opérations et les manœuvres lors du forage, donc la charge appliquée varie entre 0 jusqu'à le poids du train de sonde, mais il y a aussi le cas du remonté et décente du train de sonde, là où les charges appliquées sont considérées statiques mais lors du forage lui-même les charges sont considérées dynamiques.

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

En va choisir le cas où la butée subit des charges dynamiques, d'après SKF le tonnage maximum que la butée supporte est $P_{ts} = 551 \text{ tons}$ donc la charge dynamique maximale est [35] :

$$P_b = K \cdot P_{ts} = \left(1 - \frac{d_{boue}}{d_{aciers}}\right) \cdot P_{ts} = 4579,9020 \text{ KN} \quad (\text{III.7})$$

$d_{boue} = 1,2$: Densité de la boue.

$d_{aciers} = 7,85$: Densité des tiges de forage.

K : indice de flottabilité.

III.3.3. Simulation de la butée

La simulation se déroulera dans Simulink mais avant il faut faire une approche mathématique pour modéliser la butée afin de faire la simulation.

Pourquoi Simulink ?

Nous avons choisi Simulink en raison de sa flexibilité et sa simplicité à exécuter des simulations, il permet de modéliser le système désiré sous formes de schéma de blocs au lieu d'établir des équations mathématiques descriptives, et chaque bloc représente en réalité une ou des équations mathématiques, donc il suffit juste de les relier entre eux et d'insérer les données nécessaires afin de simuler. Mais il n'est pas toujours facile de modéliser un système avec un schéma de bloc, donc on peut parfois écrire un code dans Matlab script et le faire communiquer avec Simulink via l'espace de travail.

Dans son interface, Simulink possède plusieurs outils pour réaliser la simulation, parmi eux la bibliothèque des blocs où on trouve une multitude de blocs, on s'intéresse à la bibliothèque **Simscape** (Figure III.33) qui contient les catégories des blocs suivantes :

Electrique, Gaz, Hydraulique, Iso thermique, Magnétique, Mécanique...etc.

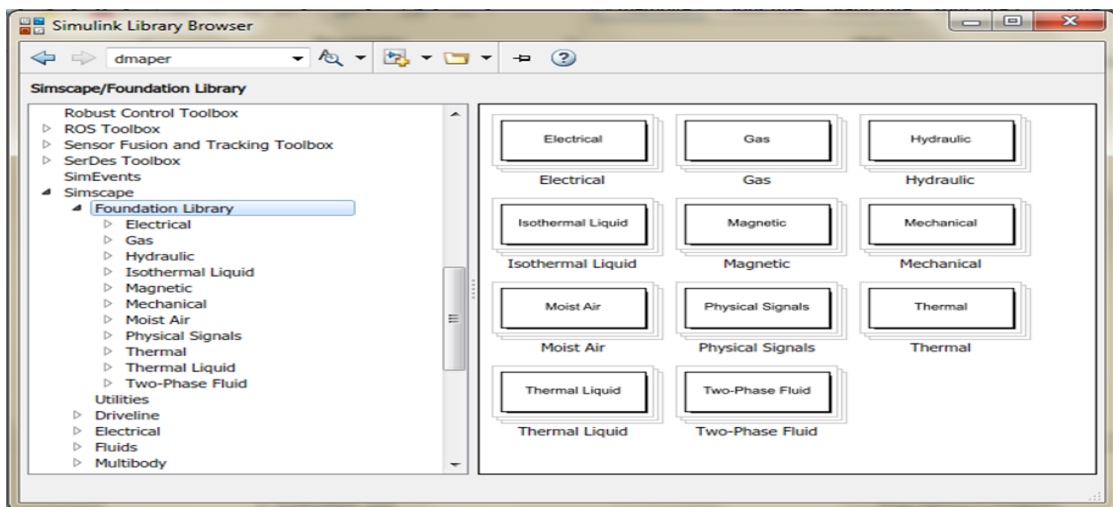


Figure III.33 - Bibliothèque Simscape

III.3.3.1. Schéma de blocs

Avant de schématiser le système il faut d'abord le simplifier à un système de masse ressort amortisseur à plusieurs degrés de libertés (Figure III.34) et calculer les coefficients d'amortissements et de rigidité correspondants.

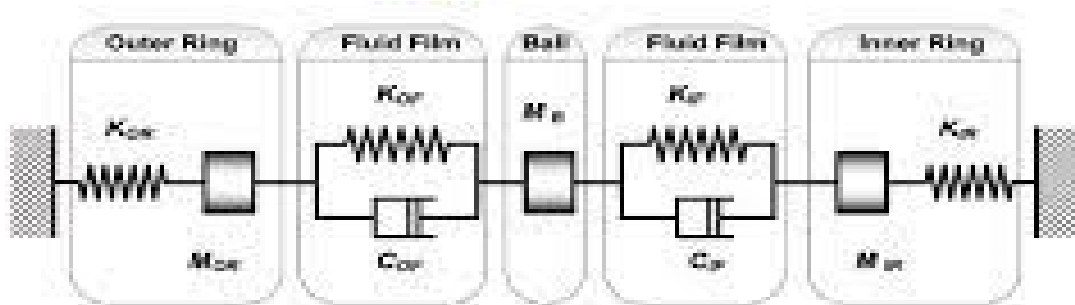


Figure III.34 - Simplification du système [29]

Avant de procéder, on va choisir en premier lieu le sens d'étude de la butée, le sens est sélectionné suivant la direction d'application des charges les plus importantes (sens axial). Les charges axiales qui s'appliquent sur la butée sont : La charge P_b mais du point de vue de l'élément roulant les charges sont : La charge P_b , le poids de la bague supérieure. Donc on va se concentrer sur la simulation de l'élément roulant, suivant l'axe de l'application des charges nommé axe Y, vue que c'est la partie la plus faible dans la butée en prenant compte des conditions critiques comme le tonnage maximum et la vitesse de rotation limité et autres conditions. Pour l'axe perpendiculaire certes il y a des vibrations et des charges qui sont pratiquement négligeables par rapport à la charge précédemment considérée.

III.3.3.2. Schéma de simulation sur Simulink

Le **quill** avec tous le poids du train de sonde relié avec le **spindle** exerce une force axiale sur l'anneau supérieur de la butée représenté par le bloc « charge » puis, l'anneau a un coefficient de rigidité et d'amortissement représenté par les blocs « ressort et amortisseur » respectivement. Le lubrifiant possède aussi une rigidité et un amortissement représenté par les blocs « ressort et amortisseur », puis la rigidité et l'amortissement du contacte Hertzien entre le rouleau et le chemin de l'anneau qui est un contact entre un cylindre et un plant représenté aussi par « ressort et amortisseur ». La butée tourne avec une vitesse déterminé et dans la simulation on va choisir deux vitesses qui sont donner par le constructeur : vitesse de référence et vitesse limite. Chaque vitesse engendre des vibrations suivant l'axe Y dans la butée, on la représente sous formes d'une source de vitesse sinusoïdale et puisque on étudie l'élément roulant, donc on applique cette source de vibration directement sur lui, puis on a la rigidité et l'amortissement du rouleau représenté aussi avec les blocs « ressort et amortisseur »

Le système est symétrique, donc on prend les demi valeurs pour la rigidité et l'amortissement du rouleau ; on a aussi la masse de l'élément roulant et un capteur de déplacement et de vitesse qui nous indique le mouvement du rouleau.

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

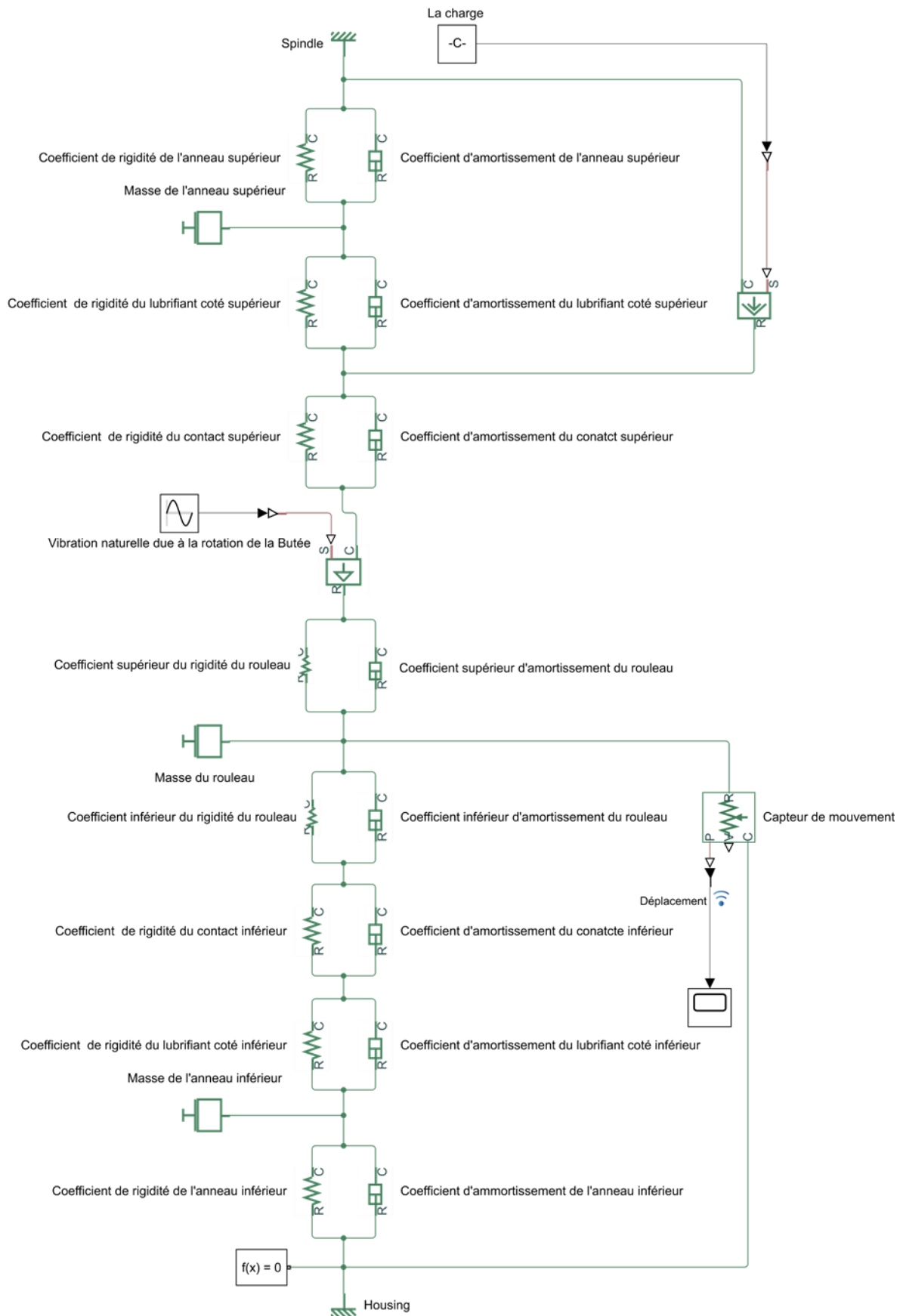


Figure III.35 – Schéma de blocs général

III.3.3.3. Calcul des coefficients de rigidité et d'amortissement

Avant de lancer la simulation on doit d'abord insérer les coefficients de rigidité et d'amortissement, mais pour cela il faut d'abord les calculer :

III.3.3.4. Rigidité de l'élément roulant

Le rouleau est sous forme d'un cône tronqué donc pour savoir sa matrice de rigidité on utilise la méthode des éléments finis en le considérant un élément poutre de section circulaire variable. D'abord il faut le discrétiser en parties, mais afin de ne pas compliquer les calculs on le décompose en 3 poutres de section circulaire différentes, pour cela on adopte la méthode des proportionnalités de Pythagore.

On suppose que le cône tronqué est un cône complet avec une section A_x variable donc d'après Pythagore [36] :

$$\frac{A_{max}}{L+l} = \frac{A_{min}}{l} = \frac{A_x}{x+l} \rightarrow \begin{cases} \frac{A_{max}}{L+l} = \frac{A_{min}}{l} \\ \frac{A_{max}}{L+l} = \frac{A_x}{x+l} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} l = L \cdot \frac{A_{min}}{(A_{max}-A_{min})} \\ A_x = \frac{(x+l)}{(L+l)} \cdot A_{min} \end{cases} \quad (III.8)$$

Au finale :

$$A_x = \frac{(A_{max}-A_{min})}{L} \cdot x + A_{min} \quad (III.9)$$

On pose : $x_i = \frac{L}{3} \cdot (i - 1)$ donc :

$$A_i = \frac{(A_{max}-A_{min})}{3} \cdot (i - 1) + A_{min} \quad (III.10)$$

Tel que :

- $i = 1$ à 3 .

- 3 : le nombre de poutre de discrétisation.

- L : la longueur du cône tronqué.

L'application numérique de (1) nous donne :

$$A_1 = 7398,95614 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 13123,9887 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = 18849,0212 \text{ mm}^2$$

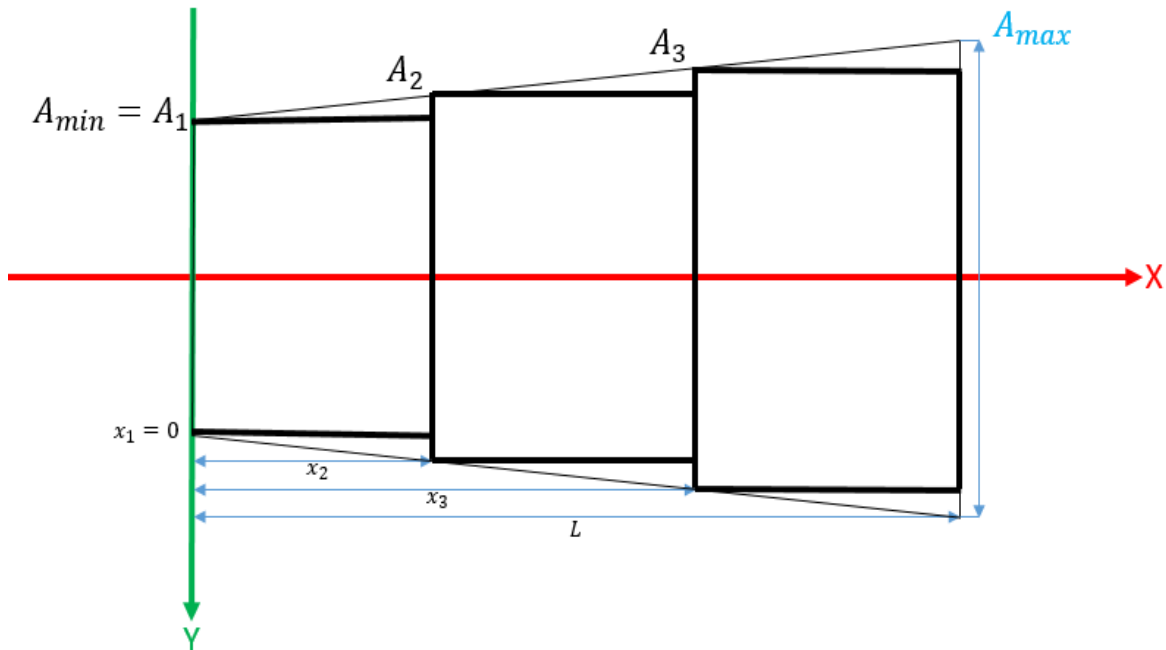


Figure III.36 – l'élément roulant après discrétisation

On cherche maintenant la rigidité du rouleau après discrétisations, en effet il possède toute une matrice de rigidité et non pas une seule valeur à cause de la nature du problème en (2D) et aussi à cause de la discrétisation, donc la dimension de la matrice est en fonction de nombre de nœud et des degrés de liberté.

D'après la (Figure III.36) on à 4 nœuds et chaque nœud possède 2 degrés de liberté et donc la dimension de la matrice de rigidité est : $d = 4 \cdot 2 = 8$ et donc le résultat seront est une matrice carrée de dimension 8.

La matrice d'un élément poutre est définie comme : $[K_e] = \frac{E.I}{l^3} \cdot \begin{bmatrix} 12 & 6.l & -12 & 6.l \\ 6.l & 4.l^2 & -6.l & 2.l^2 \\ -12 & -6.l & 12 & -6.l \\ 6.l & 2.l^2 & -6.l & 4.l^2 \end{bmatrix}$

Tel que :

- E : est le module d'élasticité.

- I : est le moment quadratique le la poutre dans notre cas : $I = \frac{\pi.D^4}{64}$ (III.11)

- D: est le diamètre du l'élément discrétisé.

Avec un programme simple dans le Matlab script on peut calculer d'une façon rapide la matrice de rigidité totale :

III.3.3.5. Rigidité des anneaux

Il suffit de calculer pour un seul anneau car ils sont identiques :

Afin de faciliter le calcul on suppose que l'anneau est un cylindre creux de diamètre extérieur et intérieur respectivement : $D = 603.25 \text{ mm}$ et $d = 279.4 \text{ mm}$ et une largeur $B = 44 \text{ mm}$ donc en compression suivant l'axe Y la rigidité est :

$$\left\{ \begin{array}{l} S = \frac{\pi(D-d)^2}{4} \\ K_a = \frac{E.S}{B} \end{array} \right. \quad (\text{III.12})$$

III.3.3.6. Rigidité du contact Hertzien

Le contact entre le rouleau et le chemin où il roule est un contacte **Hertzien** entre un cylindre et un plan, selon **Hertz** la trace du contacte est une bande de longueur identique à la longueur du cylindre est sa demi largeur est [33] :

$$b = \sqrt{\frac{4.RF}{\pi.E^*.L}} \quad (\text{III.13})$$

- R : est le rayon du cylindre.
- F : la force exercée sur le cylindre.
- L : la longueur du cylindre.
- $E^* = \frac{E}{2.(1-\mu^2)}$: le module d'élasticité réduit.
- E : module d'élasticité.
- μ : coefficient de poisson.

La pénétration soit du cylindre dans le plan où la déformation du cylindre est donnée par la formule [33] :

$$\delta = \frac{F}{\pi.L.E^*} \left(1 + \ln \frac{\pi.E^*.L^3}{R.F} \right) \quad (\text{III.14})$$

Mais selon Lankarani et Nikravesch :

Le déplacement d résultant de la déformation de l'un des corps est généralise comme [34] :

$$\delta = \left(\frac{3.F}{4.\pi.L.E^*.\sqrt{R}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{III.15})$$

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance
basée sur une simulation.

- n : entre 1.0 et 1.5, dans notre cas pour un cylindre ou un conne : $n = \frac{4}{3}$

En modifiant cette dernière formule on obtient :

$$F = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot L \cdot E^* \cdot \sqrt{R} \cdot \delta^{\frac{4}{3}} \quad (\text{III.16})$$

Par définition :

$$K_c = \frac{dF}{d\delta} \quad (\text{III.17})$$

Et donc :

$$K_c = \left(\frac{4}{3}\right)^2 \cdot \pi \cdot L \cdot E^* \cdot \sqrt{R} \cdot (\delta)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{III.18})$$

III.3.3.7. Rigidité du lubrifiant

En effet la rigidité du lubrifiant exacte peut être déterminée que par une expérience mais une équation approximative est élaborée [31] :

$$K_l = \frac{C_l \cdot \omega}{LF} \quad (\text{III.19})$$

- ω : fréquence d'excitation en (rad/s).
- C_l : coefficient d'amortissement du film d'amortissement en N/ (m/s).
- LF : coefficient de perte d'énergie, c'est une propriété du matériau au lubrifiant.

III.3.3.8. Amortissement du rouleau

Afin de déterminer l'amortissement du rouleau il nous faut le vecteur vitesse et le vecteur force de déplacement et cela n'est pas possible vue que le nombre des inconnues est supérieur au nombre des valeurs connue et donc on va juste réutiliser la formule (3.19) car elle décrit la relation entre la rigidité et l'amortissement avec une approximation assez tolérer :

$$C_r = \frac{K_r \cdot LF}{\omega} \quad (\text{III.20})$$

Puisque la rigidité ici est une matrice, on calcule la moyenne des rigidités suivant l'axe Y et on utilise le résultat dans la formule précédente pour obtenir l'amortissement du rouleau.

Pour le **LF** c'est un coefficient de perte d'énergie on le prend 0.01 dans tous les calculs, car c'est une valeur pour les roulements [31].

III.3.3.9. Amortissement du contact Hertzien

Le coefficient d'amortissement est généralement déterminé expérimentalement suite à des essais sur un système vibratoire et après le tracer du graphe le coefficient et calculer à l'aide d'une fraction simple qui compare entre les oscillations de ce graphe, mais malheureusement on ne peut pas accéder à une telle expérience, et pour cela on se contente d'utiliser la formule précédente vue qu'on possède la rigidité du contact, donc :

$$C_c = \frac{K_c \cdot LF}{\omega} \quad (\text{III.21})$$

III.3.3.10. Amortissement de l'anneau

Même chose pour l'amortissement des anneaux et donc :

$$C_a = \frac{K_a \cdot LF}{\omega} \quad (\text{III.22})$$

III.3.3.11. Amortissement du film lubrifiant

Il est déterminé expérimentalement lui aussi car la rigidité et l'amortissement du film lubrifiant change avec le changement des conditions d'exploitation tels que la vitesse de rotation et les charges exercées.

Pour un roulement simple le coefficient d'amortissement du film lubrifiant appartient à un intervalle bien déterminé par la rigidité totale du roulement suivant la relation ci-dessous [32] :

$$0,25 \cdot K_T \cdot 10^{-5} \leq C_l \leq 2,5 \cdot K_T \cdot 10^{-5} \quad (\text{III.23})$$

- K_T est la rigidité linéaire totale du roulement.

Mais cet intervalle est toujours vaste, c'est pour ça que chaque roulement à sa propre valeur suivant les conditions qu'elle subit.

Pour notre cas, et suite au manque d'expérience proche à notre travail on va utiliser une valeur approximative bien déterminée, les résultats sont alors contrôlés, et s'il y a une valeur non logique, on va la changer. L'intervalle de cette valeur est compris entre **0,25** et **2,5** et le choix sera de préférence la moyenne afin de minimiser l'erreur, ainsi :

$$C_l = 1,375 \cdot K_T \cdot 10^{-5} \quad (\text{III.24})$$

Et pour la rigidité linéaire totale de la butée il suffit juste d'additionner les rigidités calculées précédemment :

$$K_T = 2 \cdot (K_a + K_c + K_r) \quad (\text{III.25})$$

III.3.3.12. Résultats des calculs

Les calculs des rigidités et amortissements précédentes sont programmés dans le script du Matlab sous forme de code simple comme suite :

```

1  %Données
2  E=210*10^9;nu=0.285;l=0.119601;n=4/3;r=0.068485;f=282231.162;LF=0.01;
3  L=0.044;s=0.082;w0=260;%w0=500
4  s1=((0.60325-0.2794)^2)*pi/4;
5  % Module d'élasticité réduit et deformation de Hertz:
6  e=E/2*(1-(nu^2));
7  d=(f/(1*pi*e))*(1+log((pi*e*(l^3))/(r*f)));
8  %Coefficient de rigidité de conatct suivant y :
9  Kc=(16/9)*pi*l*e*sqrt(r)*((d)^(1/3));
10 %Moyenne des coefficients de rigidité de l'élément roullant suivant y :
11 Kr=(5379456740.3529+19557459250.7899+19557459250.7899+5379456740.3529+14178002510.437)/5;
12 %Coefficient de rigidité de l'anneau superieur et inferieur suivant y :
13 Ka=(E*s)/L;
14 %Coefficient d'amortissement du contact suivant y :
15 Cc= ((LF*Kc)*10^-3)/w0;
16 %Coefficient d'amorstissement du contact suivan y :
17 Cr= ((LF*Kr)*10^-3)/w0;
18 %Coefficient d'amortissement de l'anneau svuivant y :
19 Ca= ((LF*Ka)*10^-3)/w0;
20 %Coefficient d'amortissement du lubrifiant svuivant y :
21 Kt= 2*(Kc+Kr+Ka)*10^-3;
22 Cl=1.375*Kt*10^-5;
23 %Coefficient de rigidité du lubrifiant suivant y :
24 Kl= (Cl*w0)/(LF*10^-3);
25

```

Figure III.39 – Programme de calcul

Name	Value
Ca	1.5052e+04
Cc	28.7604
Cl	1.1135e+04
Cr	492.7064
d	8.7182e-05
e	9.6471e+10
E	2.1000e+11
f	2.8223e+05
Ka	3.9136e+11
Kc	7.4777e+08
Kl	2.8952e+11
Kr	1.2810e+10
Kt	8.0984e+08
l	0.1196
L	0.0440
LF	0.0100
n	1.3333
nu	0.2850
out	1x1 SimulationOutput
r	0.0685
s	0.0820
s1	0.0824
w0	260

Figure III.40 – Résultats calculés

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

On implémente chaque résultat dans les blocs correspondants :

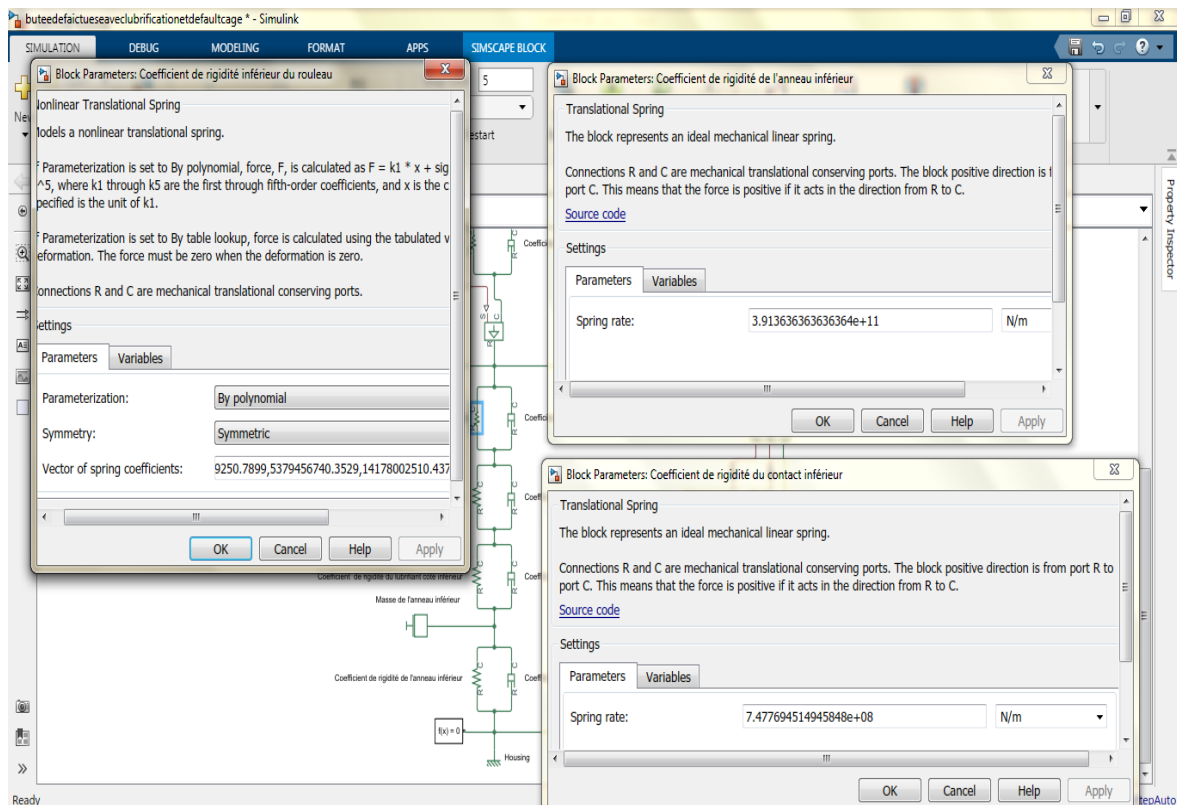


Figure III.41 – Implémentation des résultats

Pour la rigidité de l'élément roulant on prend que les valeurs suivant l'axe Y du vecteur diagonal de la matrice calculée précédemment et on les divise sur 2.

La simulation est réalisée pour des vitesses de rotation de **260 tours par minute** et **500 tours par minute**, ces valeurs représentent successivement la vitesse de référence et la vitesse limite donnée par la fiche technique du **BFS-8033**, donc chaque cas aura deux cas aussi pour ces différentes vitesses et puisque on a neuf (9) cas différents dans leur nature de défauts, en totale on aura **18** simulation et donc **18** résultats distincts.

Les **9** cas sont choisis à cause du types de default possible pour la butée, en prenant compte la lubrification, donc on a :

III.3.3.13. Butée non défaillante sans lubrification

C'est le premier cas qu'on a simulé, il représente une butée sans défaut que ce soit neuf ou pas mais elle est en excellente état sans film lubrifiant, dans ce cas le Schéma bloc est le même de la figure III.35 mais sans rigidités et amortissements du lubrifiant. On simule ce cas avec **260 et 500 tours par minute**.

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

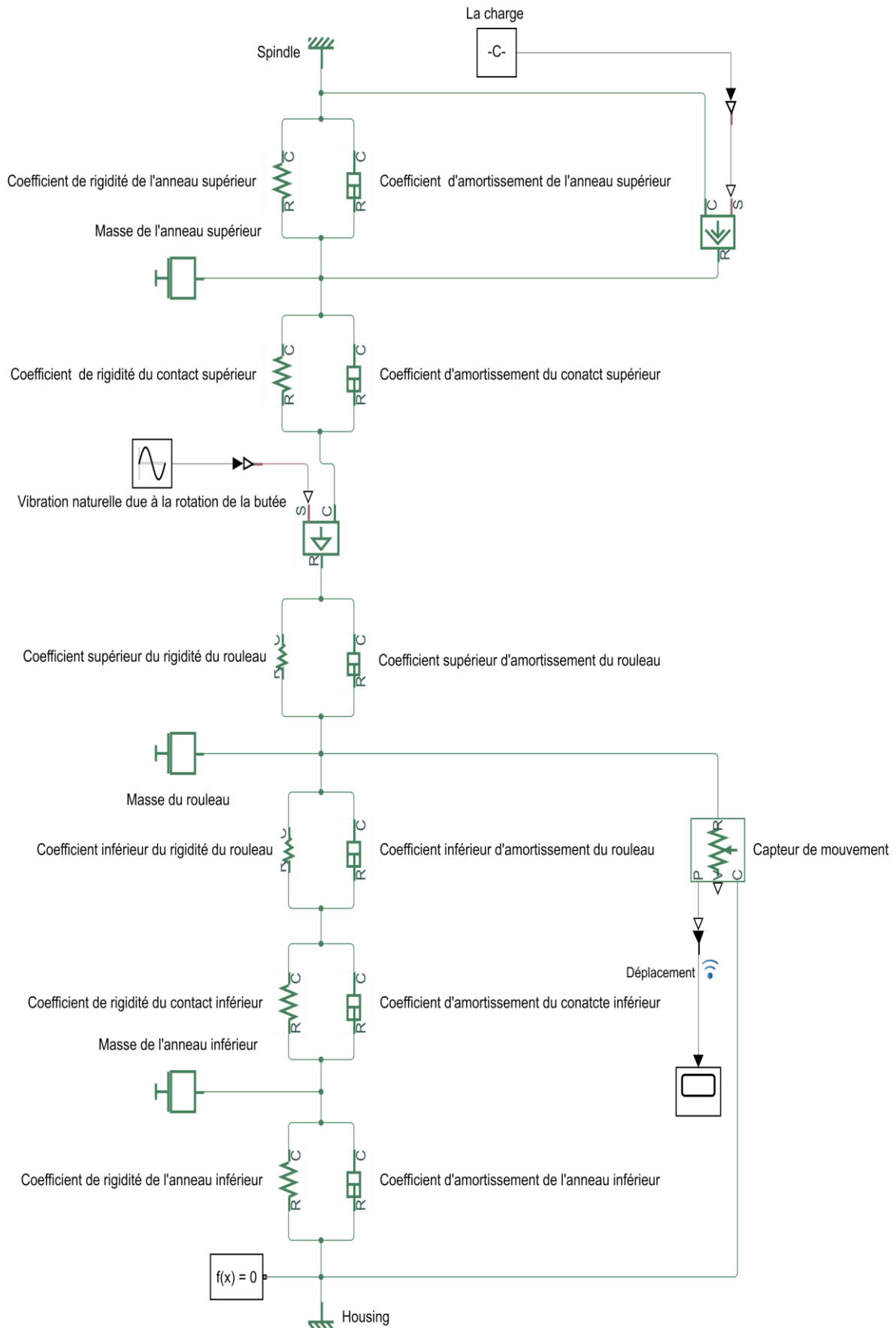


Figure III.42 – Schéma de blocs pour une butée non défailante et sans lubrification

III.3.3.14. Butée non défaillante avec lubrification

Même schémas de blocs que la figure III.35

III.3.3.15. Butée avec lubrification et un défaut dans la cage

Ce cas représente une butée lubrifiée mais avec un défaut dans la cage, ce défaut engendre des vibrations avec une fréquence spéciale qui affecte la rotation normale de la butée, la seule différence entre les schémas de blocs de ce cas et celui de la figure III.35 est la fréquence appliquée sur la butée, en plus de la fréquence normale on additionne la fréquence du défaut de cage.

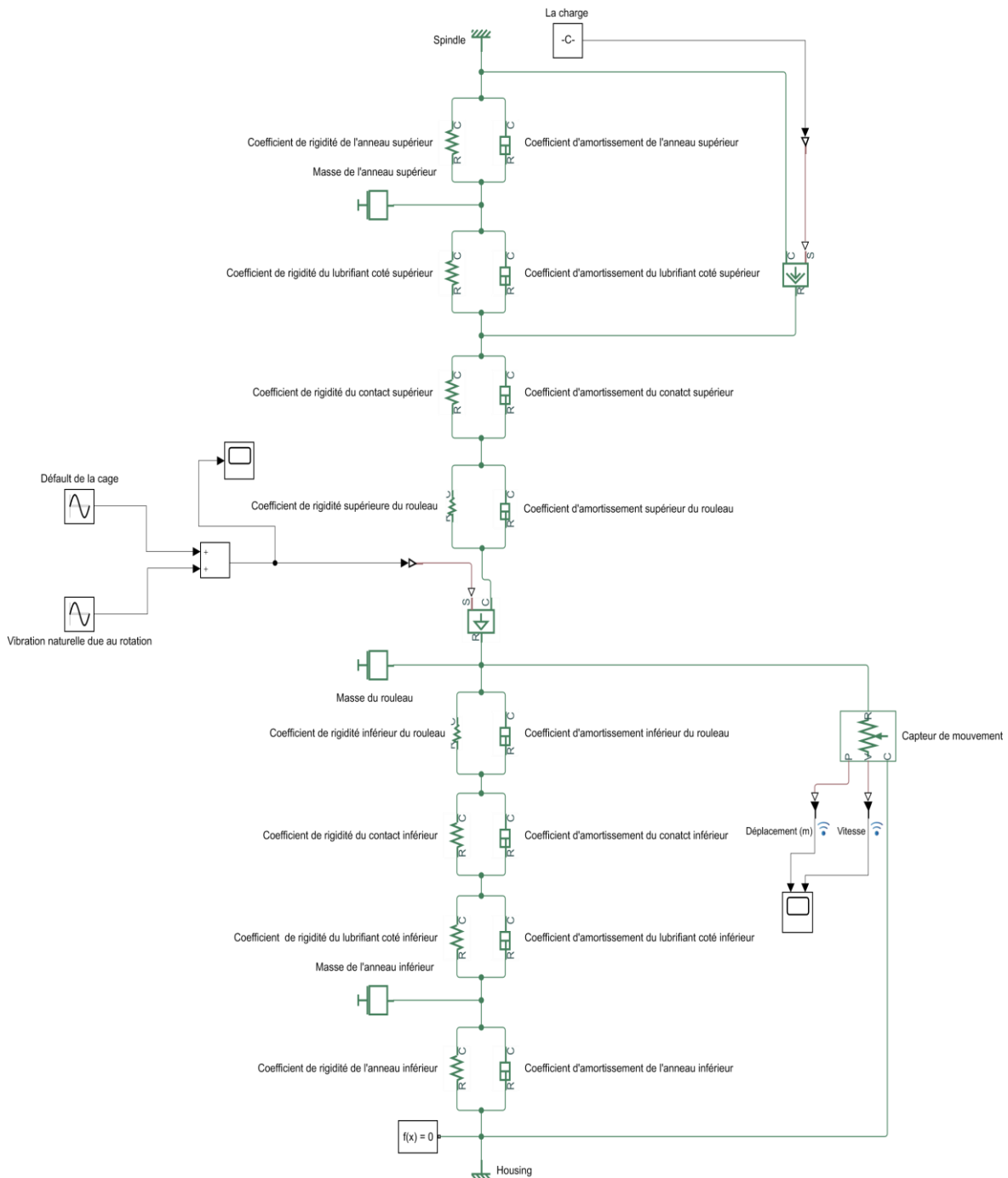


Figure III.43 – Schéma blocs d'une butée lubrifiée avec un défaut dans la cage

III.3.3.16. Butée avec lubrification et un défaut dans l'un des anneaux

La seule différence est dans la fréquence appliquée on supprime la fréquence de défaut de de cage et on implémente celle de l'un des anneaux et le schéma deviendra :

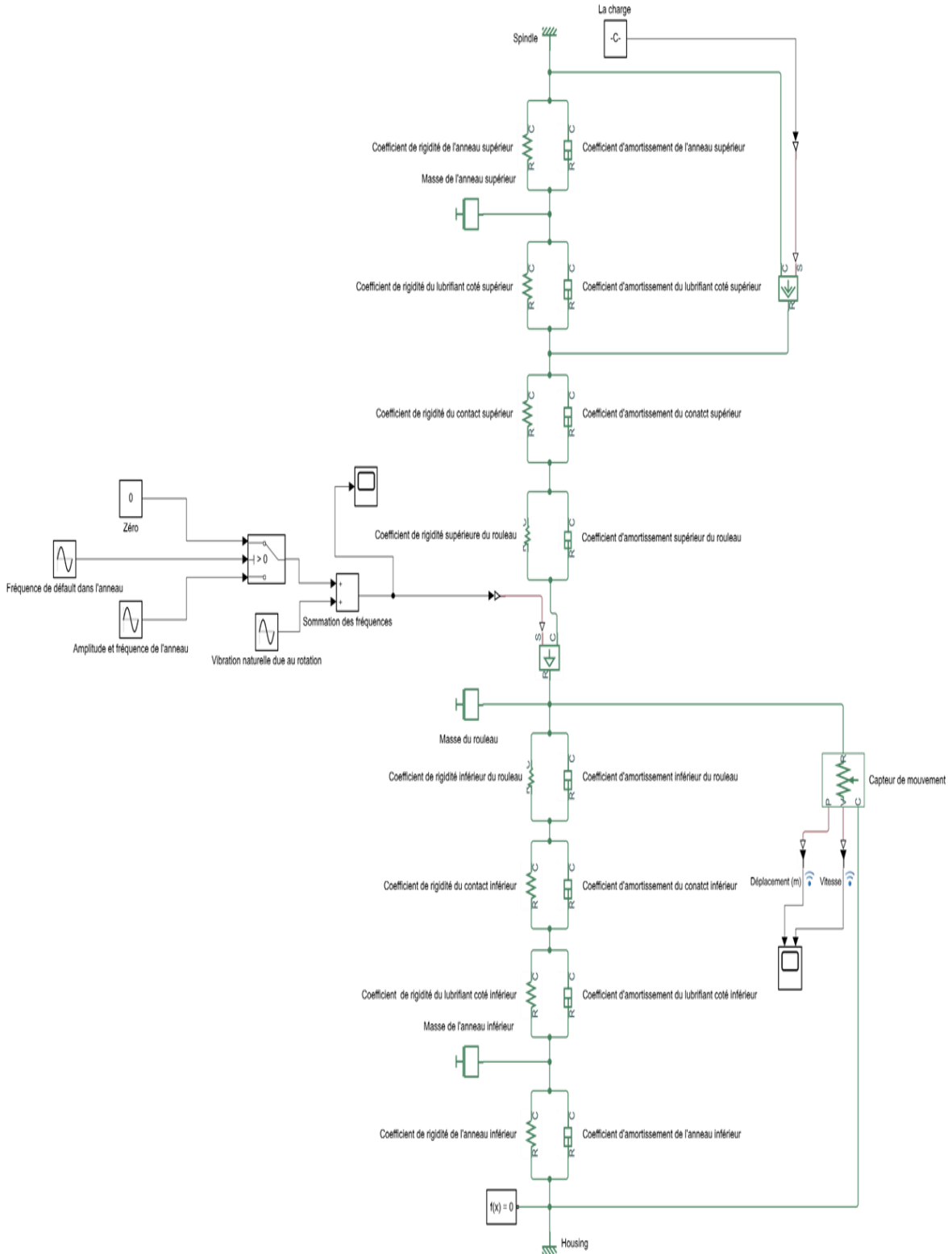


Figure III.44 – Schéma blocs d’une butée lubrifiée avec un défaut dans l’anneau

III.3.3.17. Butée avec lubrification et un défaut dans le rouleau

Même principe du cas précédent, on enlève juste la fréquence appliquée de l'anneau et on la remplace avec celle du défaut du rouleau :

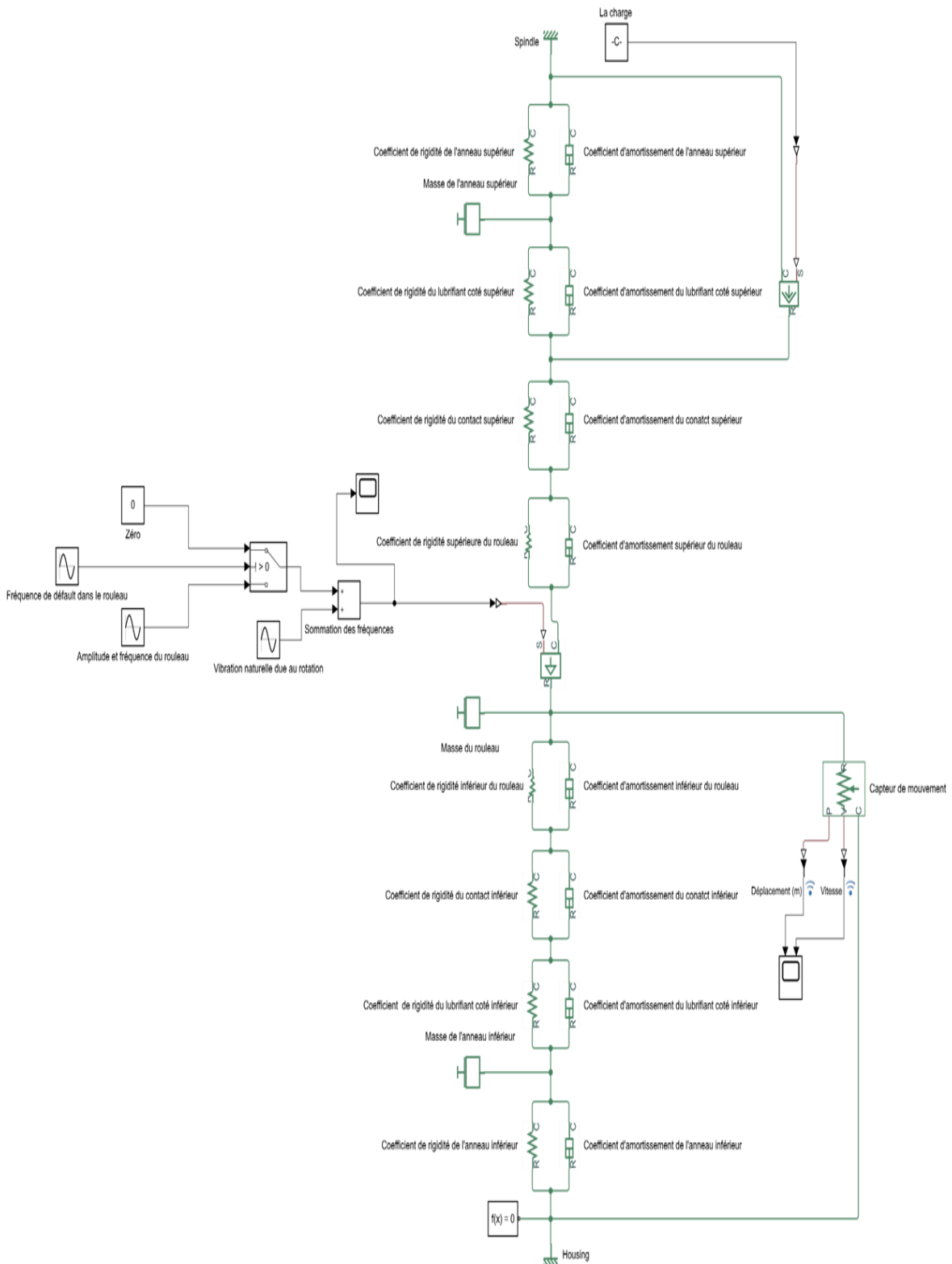


Figure III.45 – Schéma blocs d’une butée lubrifiée avec un défaut dans le rouleau

Ce qui reste de cas (défaut de cage et anneau, cage et rouleau, anneau et rouleau ou cage avec anneaux et rouleau) sont juste une combinaison des trois cas précédents, le changement est juste sur l'addition de la fréquence appliquée mais comment calculer ces fréquences ?

III.3.4. Calcul des fréquences

En effet pour un roulement simple qui supporte des charges radiales ses fréquences de défaut peuvent être calculées par 4 équations bien déterminées (Figure III.46) par la géométrie du roulement cependant il y a pas d'équations destinées pour notre cas de butée mais on peut modifier celle du roulement pour l'adapté en quelque sorte à notre problème.

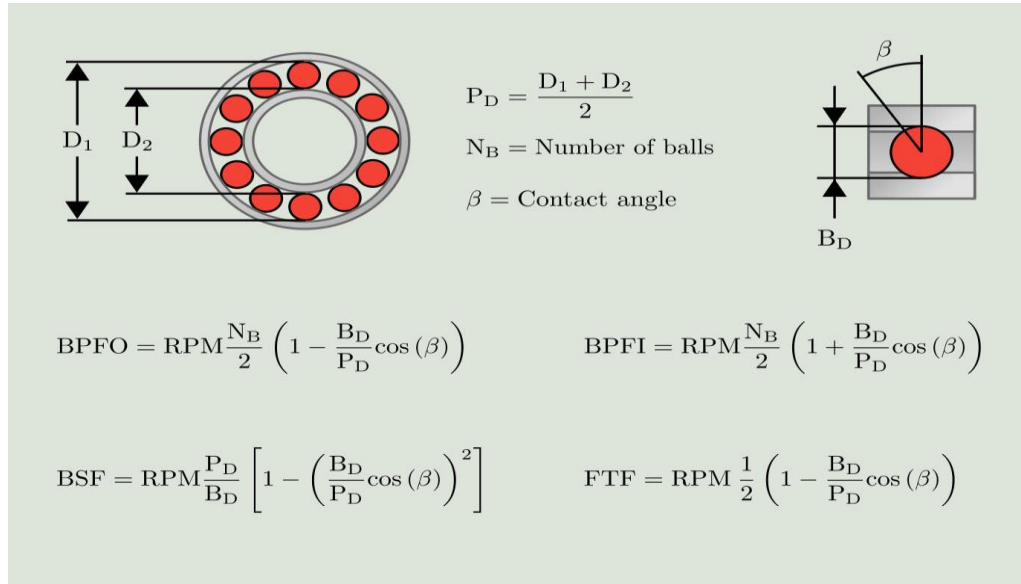


Figure III.46 – Equations des fréquences de roulement [30]

Pour un roulement simple les fréquences des équations des défauts sont :

- Défaut de cage : $f_c = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) f_0$ (III.26)

- Défaut de la bague intérieur : $f_{in} = f_c \cdot Z = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) f_0 \cdot Z$ (III.27)

- Défaut de la bague extérieur : $f_{ou} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) f_0 \cdot Z$ (III.28)

- Défaut de l'élément roulant (balle) : $f_i = \frac{D_m}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D_m} \cos \alpha \right)^2 \right) f_0 \cdot Z$ (III.29)

Tel que :

- f_0 : fréquence naturelle de rotation du roulement.

- Z : nombre d'éléments roulants dans ce cas des balles.

- $D_m = \frac{D_{extérieure} + D_{intérieure}}{2}$ (III.30)

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance
basée sur une simulation.

- d : diamètre de l'élément roulant.
- α : angle de contact de l'élément roulant.

Ces équations sont valables pour un roulement car les vibrations sont sur le concept de vibration de cage, le sens de la vibration de la cage est déterminé par le terme « $\cos \alpha$ », si ce terme est particulier pour les vibrations du roulement qui sont suivant une direction radiale comment les rendront suivant une direction axiale ?

La fonction mathématique la plus évidente est la fonction tangente « $\tan x$ » car elle transforme le cosinus en sinus et donc du horizontale au verticale ou du radiale au axiale, est les équations qui déterminent les fréquences des vibrations de la butée supportant des charges axiales sont comme suite :

- Défaut de cage : $f_c = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d_m}{D_m} \cos \alpha \cdot \tan \alpha \right) f_0$ (III.31)

- Défaut de la bague intérieur : $f_{in} = f_c \cdot Z = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d_m}{D_m} \cos \alpha \cdot \tan \alpha \right) f_0 \cdot Z$ (III.32)

- Défaut de la bague extérieur : $f_{ou} = f_{in}$ (III.33)

- Défaut de l'élément roulant (balle) : $f_i = \frac{D_m}{d_m} \left(1 - \left(\frac{d_m}{D_m} \cos \alpha \cdot \tan \alpha \right)^2 \right) f_0 \cdot Z$ (III.34)

- d_m : diamètre moyen du rouleau conique.

Dont avec simplification les équations finales sont :

- Défaut de cage : $f_c = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d_m}{D_m} \sin \alpha \right) f_0$ (III.35)

- Défaut de la bague intérieur : $f_{in} = f_c \cdot Z = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d_m}{D_m} \sin \alpha \right) f_0 \cdot Z$ (III.36)

- Défaut de la bague extérieur : $f_{ou} = f_{in}$

- Défaut de l'élément roulant (balle) : $f_i = \frac{D_m}{d_m} \left(1 - \left(\frac{d_m}{D_m} \sin \alpha \right)^2 \right) f_0 \cdot Z$ (III.37)

Application numérique :

- $d_m = \frac{D_{max} + D_{min}}{2} = \frac{88,443 + 44,53}{2} = 68,53 \text{ mm}$

- $D_m = \frac{D_{extérieur} + D_{intérieur}}{2} = \frac{603,25 + 279,4}{2} = 441,325 \text{ mm}$

- $\alpha = 9,605^\circ$ (calculer précédemment).

- $Z = 16$

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

- Défaut de cage : $f_c = 0,48. f_0$ (III.38)

- Défaut de la bague intérieur : $f_{in} = f_c. Z = 7,68. f_0$ (III.39)

- Défaut de la bague extérieur : $f_{ou} = f_{in}$

- Défaut de l'élément roulant (balle) : $f_i = 6,436. f_0$ (III.40)

f_0 est la fréquence de la vitesse de rotation de notre butée **4,333 HZ** pour **260 tours par minute** et **8,333 HZ** pour **500 tours par minutes**.

Les vibrations des défauts sont insérées dans les blocs sources de vibration (Figure III.47), ces types de blocs ont une boîte de dialogue pour entrer les valeurs, l'aspect et l'amplitude des vibrations. Les vibrations ont un aspect sinusoïdal car les formules précédentes l'indiquent, quand à l'amplitude qui représente le déplacement additionnel causé par le défaut de cavitation est modélisée par une formule simple :

$$H = r_m - \sqrt{(r_m)^2 - \left(\frac{w_d}{2}\right)^2} \quad (III.41)$$

- w_d : est la largeur du défaut.

- r_m :Le rayon moyen du rouleau.

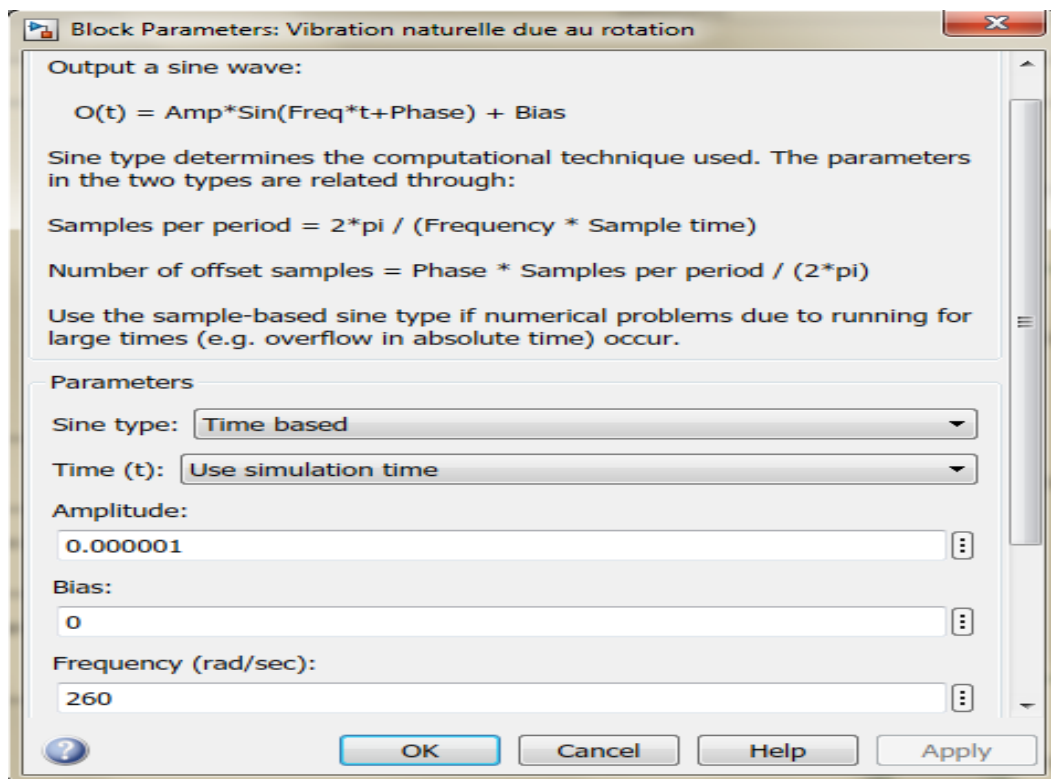


Figure III.47 – Boîte de dialogue du bloc source de vibration

Les causes majeures de ces défauts sont les charges alternées exercées sur les pistes par les éléments roulants. Ces efforts mènent au phénomène d'écaillage qui est la dégradation des surfaces par cause des cisaillements répétés, il ne se produit pas dans les premiers cycles de marches mais avec le temps les surfaces se fatigues et les défauts sous formes de cavitation peuvent apparaitre. Malheureusement ce phénomène est inévitable et la formation des défauts est aléatoire ainsi leurs tailles donc on ne peut pas calculer les dimensions des défauts sans faire une expérience réelle, alors pour calculer les amplitudes des vibrations il faut suggérer les dimensions des cavitations puis calculer les déplacements résultants avec la formule précédentes [55].

Il y a un cueille à ne pas dépasser lors de propositions des déplacements causés par les défauts, le déplacement max doit être inférieur ou égale à la déformation totale permanente causé par la charge statique de base, cette déformation est d'ordre de **0,0001 du diamètre** de l'élément roulant [54], donc ne pas dépasser le **0,000004853 m**.

III.3.5. Lancement de la simulation

Après faire entrées toutes les valeurs dans le schéma bloc on est prêt à lancer la simulation, mais comment voir les résultats de la simulation ? Et comment les enregistrés ?

La figure III.48 représente un capteur de mouvement et de vitesse utilisé pour capter les vibrations de notre butée, la vibration par définition est un déplacement autour d'une position fixe et donc naturellement on va capter et enregistrer des déplacements mais pour des fréquences élevées il est recommander de capter la vitesse et même l'accélération afin de percevoir les résultats d'une façon plus claire, la figure 4.49 montre le types d'enregistrement recommander pour chaque domaine de fréquence.

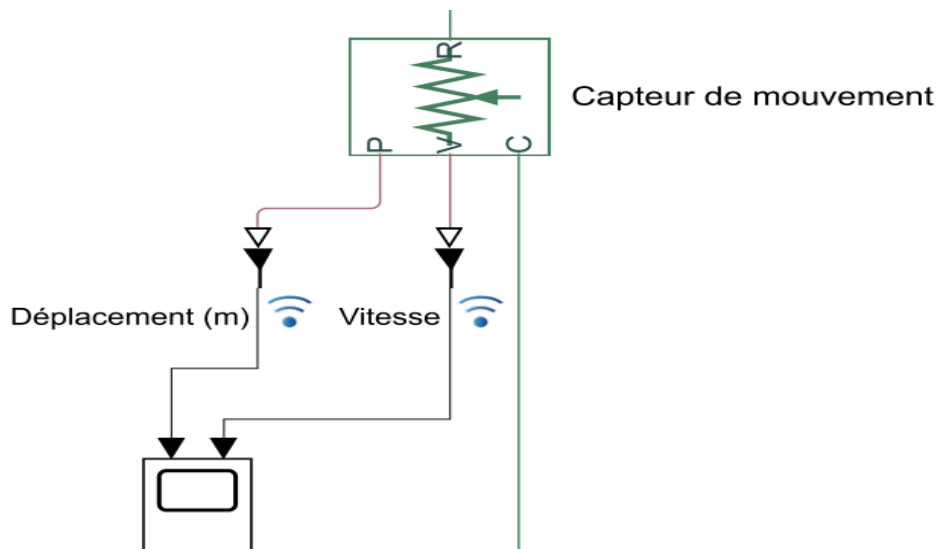


Figure III.48 – Capteur de mouvement utilisé

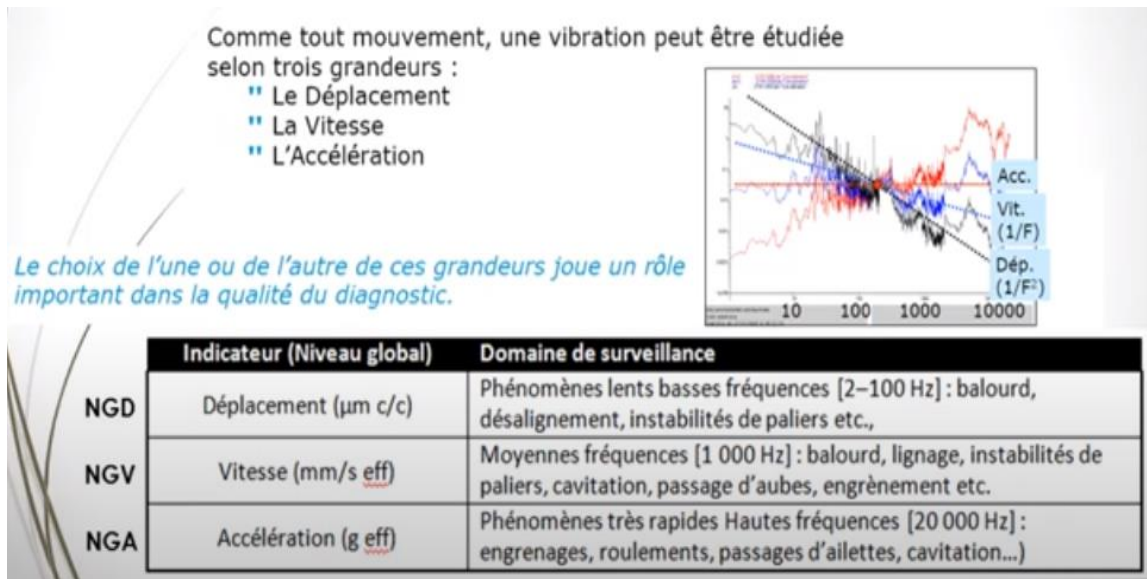


Figure III.49 – Choix recommandés pour étude de vibration [36]

Pour notre simulation ont à que des vibrations relativement lentes à basse fréquences car la vitesse de rotation de la butée et relativement faible (260 et 500 tours par minute).

Les signaux vitesse et déplacement sont affichés grâce au data inspector (Figure 4.23) sur Simulink il est même le moyen pour exporter les résultats des simulations hors Matlab sous forme de fichier « .mat ou .xlsx ».

III.3.6. Résultats des simulations et interprétation

Chaque cas de défaut est simulé pour deux vitesse différente a fin de percevoir l'impact de la vitesse sur le comportement de la butée, mais tous les cas ci-dessus sont des anomalies et en principe non favorable pour la santé du BFS-8033 sauf le cas lubrifiée en absence de défaut car c'est notre cas idéal.

III.3.6.1. Butée non défaillante avec lubrification

Les résultats du cas butée lubrifiée sans défauts sont illustrés ci-dessous pour deux vitesses :

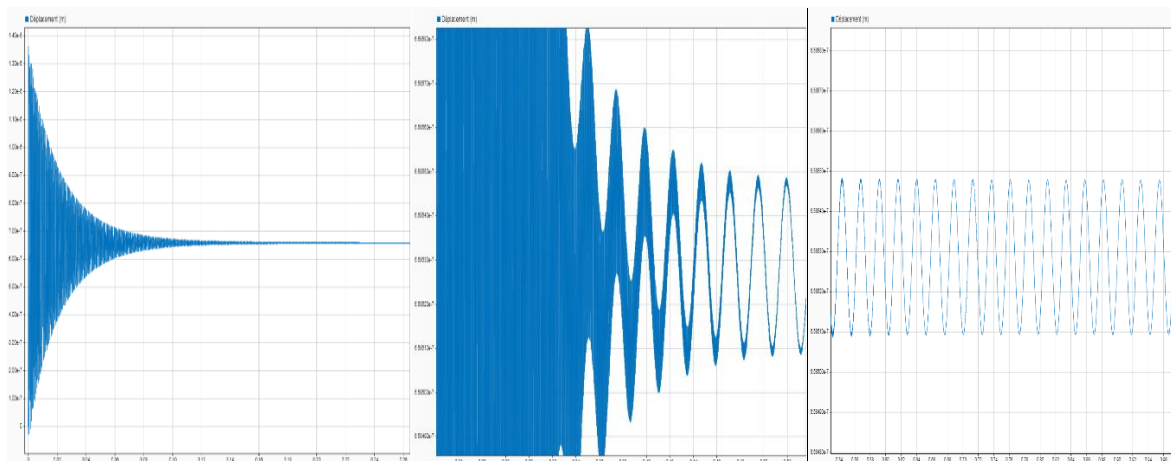


Figure III.50 – Graphe pour une butée non défaillante avec lubrification pour 260 tour/min

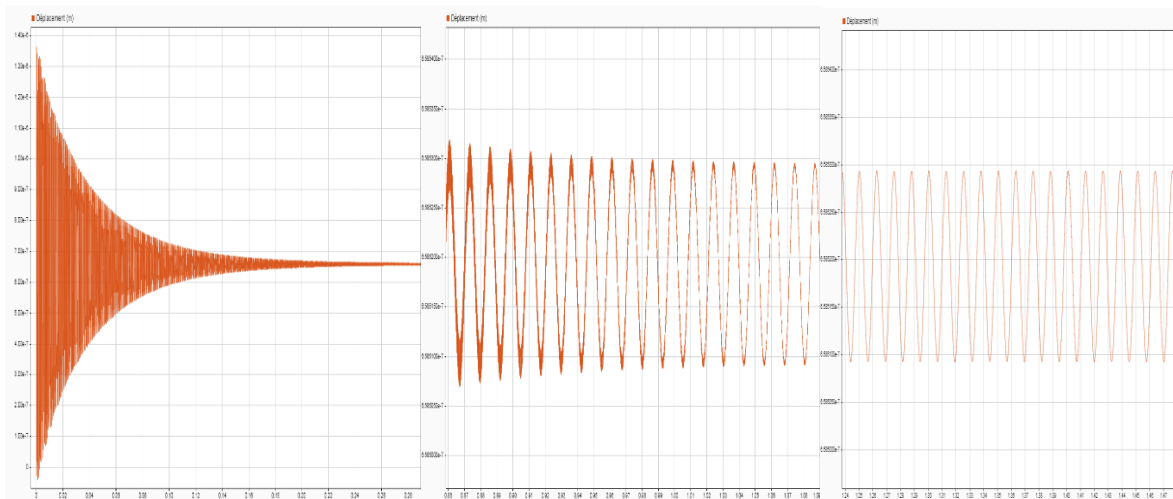


Figure III.51 – Graphe pour une butée non défaillante avec lubrification pour 500 tour/min

Les amplitudes pendant le démarrage se manifestent par des grandes valeurs ($1,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ pour une vitesse de $n = 260 \text{ tour/min}$ et $n = 500 \text{ tour/min}$) mais après environ 0,6 seconde pour le premier cas et 1,24 seconde pour le deuxième cas, les amplitudes oscillent successivement autour d'une valeur de ($0,0004 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ et $0,0002 \cdot 10^{-7} \text{ m}$).

Ces graphes se présentent comme graphe de référence qui indique l'état de bon fonctionnement de la butée et tout graphe qui s'éloigne présente une anomalie. Ces résultats peuvent être conservés dans le temps car la bonne lubrification protège la structure de matériau de la butée de toutes dégradations.

III.3.6.2. Butée non défaillante sans lubrification

Les figures suivantes indiquent le déplacement de la butée sans lubrification pour les deux cas de vitesses et avant présence de défaut.

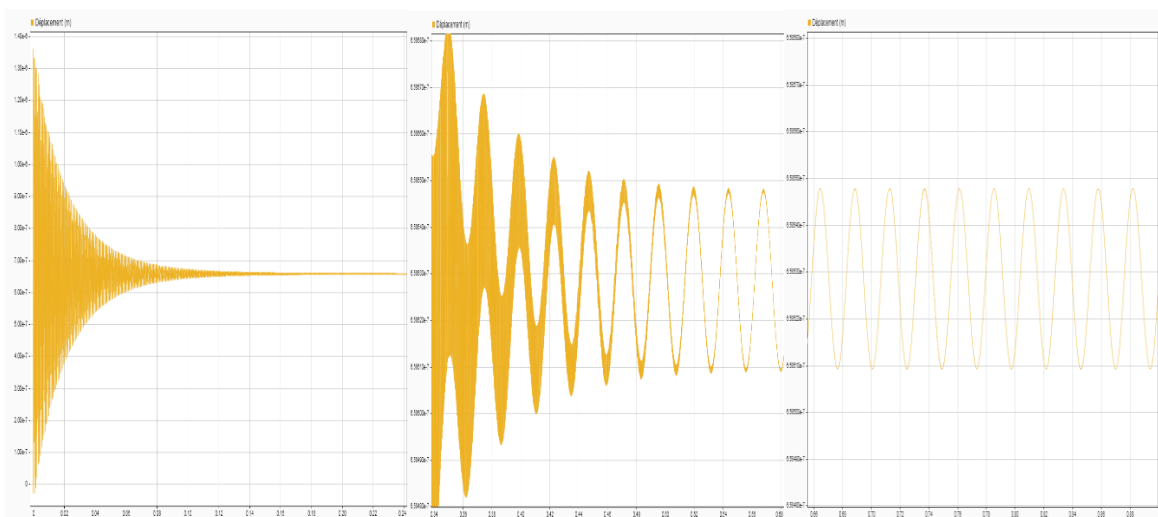


Figure III.52 – Graphe pour une butée non défaillante sans lubrification pour 260 tour/min

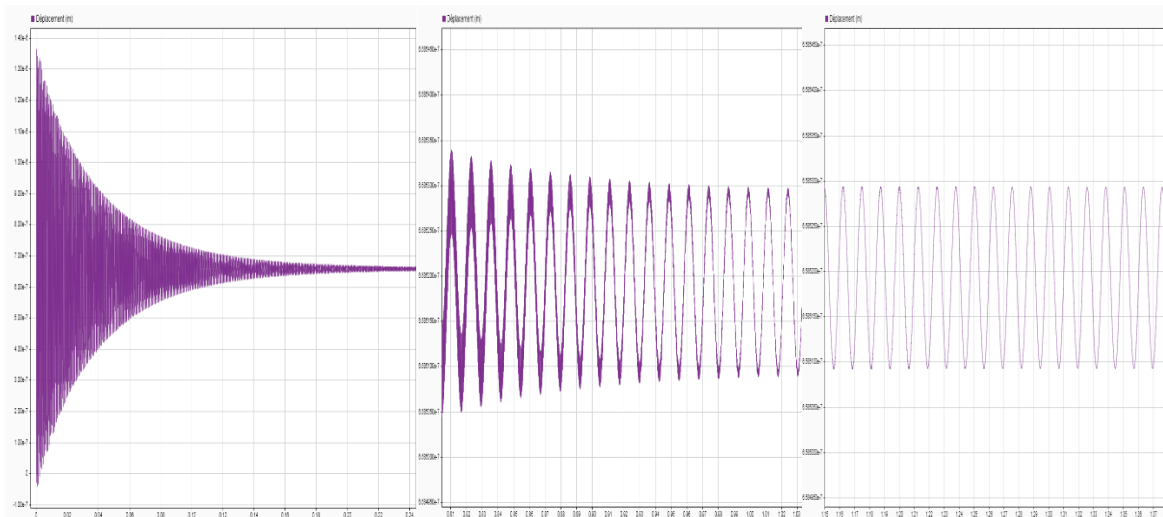


Figure III.53 – Graphe pour une butée non défaillante sans lubrification pour 500 tour/min

On voit clairement qu’avant **0,58 seconde** pour la première vitesse et **1,12 seconde** pour la deuxième vitesse une présence de grandes valeurs de déplacement causées par le démarrage (**$1,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}$** pour **$n = 260 \text{ tour/min}$** et **$n = 500 \text{ tour/min}$**) de la butée. Les vibrations s’amortissent avec le temps et le mouvement de la butée se stabilise puis reste dans un régime permanent avec des petites oscillations d’ordre (**$0,00038 \cdot 10^{-7} \text{ m}$** et **$0,0002 \cdot 10^{-7} \text{ m}$** successivement).

Ces résultats ne peuvent pas être conservés dans le temps car l’absence du lubrifiant fait naître des forces de frottement causant un sur-échauffement du matériau de la butée par conséquent la destruction de sa structure ce qui donne naissance à des défauts qui vont engendrer des vibrations supplémentaires et fausser ces résultats.

III.3.6.3. Butée avec lubrification et un défaut dans la cage

Les graphes ci-dessous présentent les vibrations en présence d’un défaut de cage pour 260 et 500 tours par minute :



Figure III.54 – Butée avec lubrification et un défaut dans la cage pour 260 tour/min

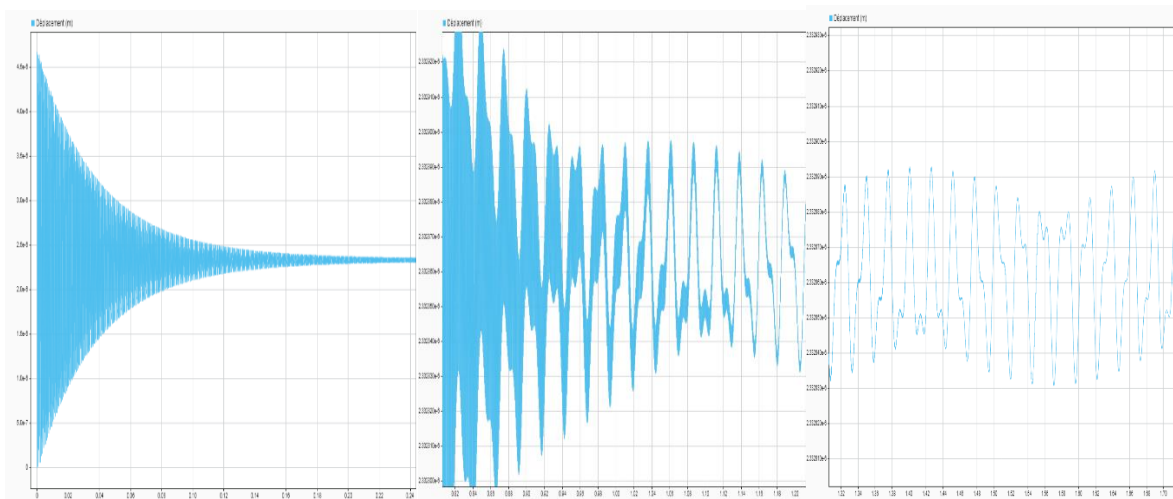


Figure III.55 – Butée avec lubrification et un défaut dans la cage pour 500 tour/min

On note que ces graphes sont différents que celui de notre cas idéal. Les valeurs d’oscillations pour les deux cas de démarrage sont **$3,35 \cdot 10^{-6}m$** et **$4,75 \cdot 10^{-7}m$** avant **0,64 s** et **1,4 s** successivement, puis ces amplitudes varient à cause de défaut de cage qui se manifeste sous forme d’harmoniques répétitives suivant la fréquence d’apparition du défaut et possédant des valeurs de (**$0,0001 \cdot 10^{-6}m$** pour **$n = 260 \text{ tour/min}$** et **$0,000051 \cdot 10^{-6}m$** **$n = 500 \text{ tour/min}$**).

D’après le graphe ces valeurs sont conservés avec le temps car dans le régime stationnaire les oscillations se répètent à chaque cycle sans changer d’allure par ce que ces types de defaults sont lentement croissantes car la cage ne subit pas les charges mais juste conserve les éléments roulant pour ne pas se dispersées.

III.3.6.4. Butée avec lubrification et un défaut dans l’anneau

Les déplacements résultants lors de la présence d’un défaut dans l’un des anneaux pour les deux cas de vitesses sont :

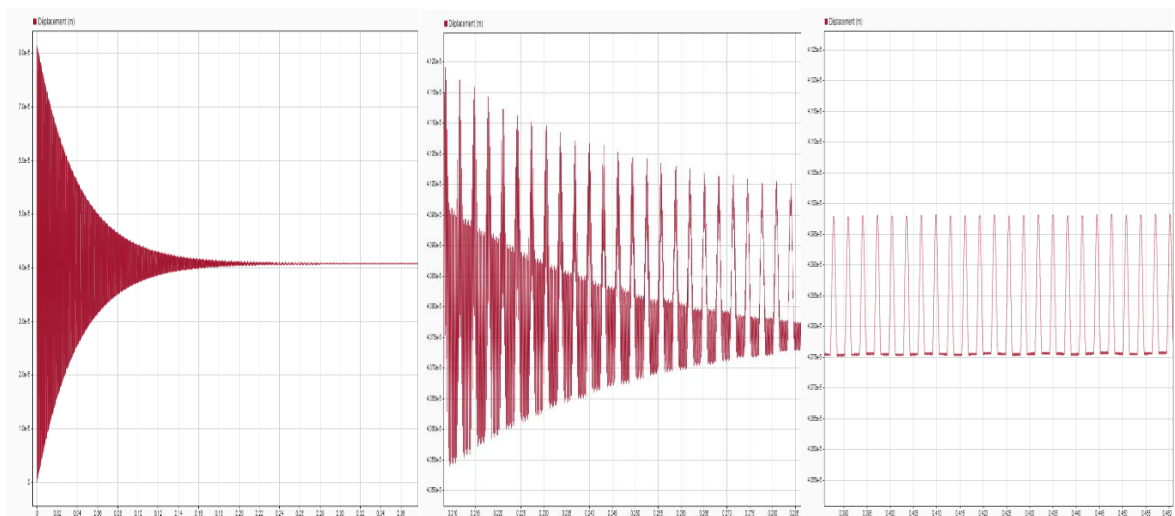


Figure III.56 – Butée avec lubrification et un défaut dans l’anneau pour 260 tour/min

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

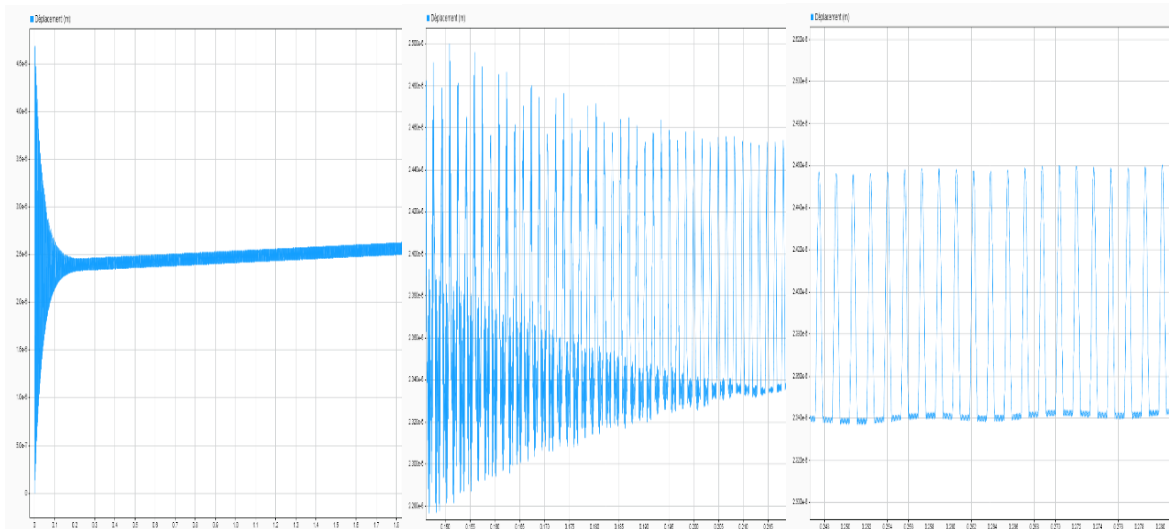


Figure III.57– Butée avec lubrification et un défaut dans l’anneau pour 500 tour/min

On remarque que l’allure des graphes précédents sont totalement différentes de celle de notre cas idéal dans de ce qui concerne les amplitudes de démarrage pour les deux vitesses ($8.10^{-5}m$ et $4,75.10^{-5}m$), le temps de début du régime permanent ($0,35s$ et $0,24s$) et les amplitudes après le régime stationnaire $0,025.10^{-5}m$ et $0,12.10^{-6}m$. Ces résultats ne sont pas constants suivant le temps car les amplitudes soit pour **260 ou 500 tour par minute** s’accroissent, physiquement cela veut dire que le default dans l’anneau s’aggrave et devient plus en plus grand en cas de marche de la butée après l’apparition de ce default. En cas de continuité d’utilisation de la butée le défaut devient très grand et peut causer à n’importe quel moment la rupture de l’anneau.

La figure ci-dessous présente la super position des deux graphes précédents afin de voir la différence entre eux :

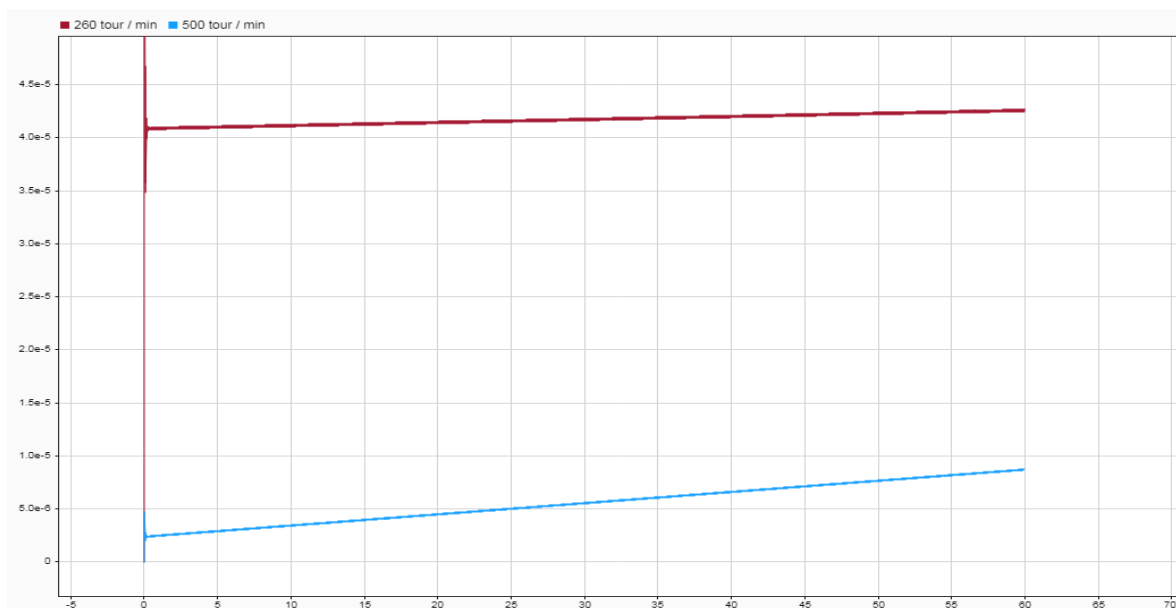


Figure III.58 – Comparaison entre les graphes du cas de défaut dans l’anneau

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

On distingue que pour $n = 260 \text{ tour/min}$ les valeurs d'amplitudes des déplacements sont quasiment supérieur à celle pour $n = 500 \text{ tour/min}$ et cela est dû à la différence de rigidité entre les deux cas car le déplacement augmente avec la diminution de la rigidité et vice-versa, par contre, l'augmentation dans le cas d'une excitation de 500 tour/min est presque le double de celle du 260 tour/min et cela est totalement logique car à chaque fois que la vitesse est importante, le temps de détérioration de la butée sera plus petit.

III.3.6.5. Butée avec lubrification et un défaut dans le rouleau

Le déplacement pour les deux cas de vitesse en présence de défaut de l'élément roulant sont illustrés dans les figures suivantes :

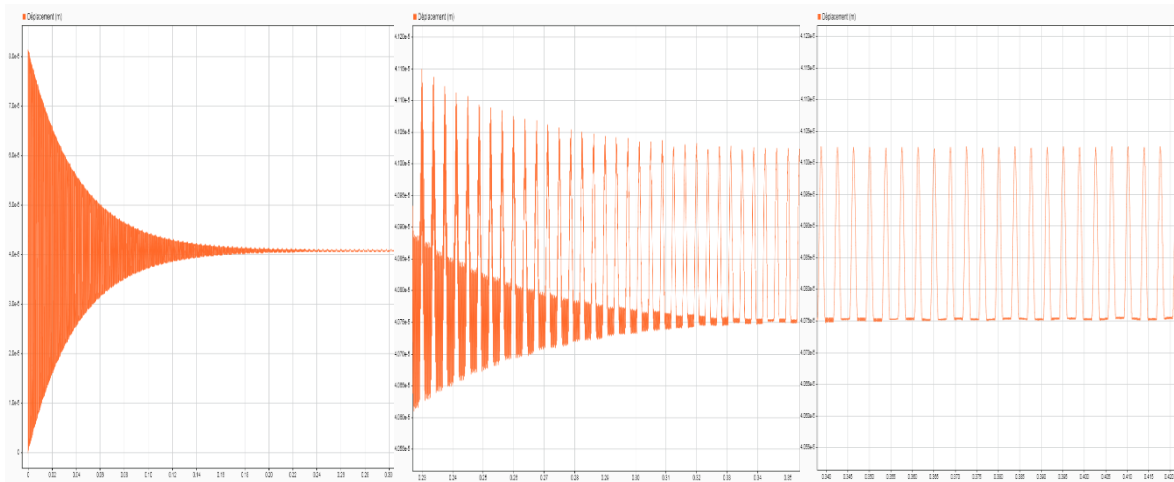


Figure III.59 – Butée avec lubrification et un défaut dans le rouleau pour 260 tour/min

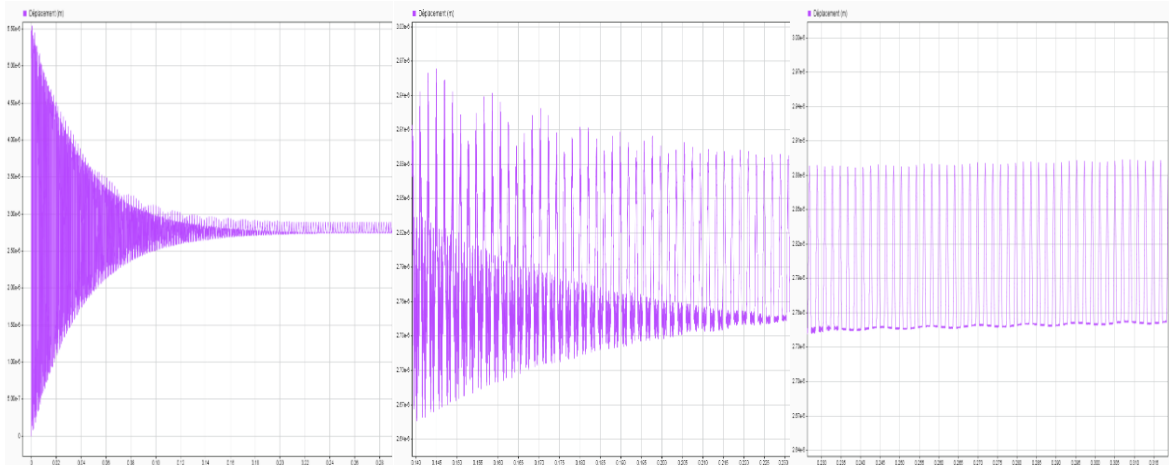


Figure III.60 – Butée avec lubrification et un défaut dans le rouleau pour 500 tour/min

Dans la phase de démarrage les amplitudes sont maximales et prennent les valeurs suivantes pour $n = 260 \text{ tour/min}$ on commence de $8 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ et pour $n = 500 \text{ tour/min}$ on a $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ puis ces amplitudes diminuent graduellement à cause de l'amortissement de la **BFS-8033**, et le lubrifiant jusqu'au $0,0275 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ et $0,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ qui correspondent successivement au temps **0,36s** et **0,24s** pour les deux vitesses. On constate une différence

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

entre ce cas et le cas idéal qui se manifeste sous formes d'harmoniques car l'élément roulant est le plus à subir des contraintes, donc une rupture est probable si la butée reste opérationnelle sous ces conditions. Ces résultats ne sont pas conservés dans le temps car similaire au cas de défaut d'anneau les anomalies croient au fur et à mesure de l'utilisation de la butée.

La figure ci-joint montre la superposition des graphes précédents afin de les comparer :

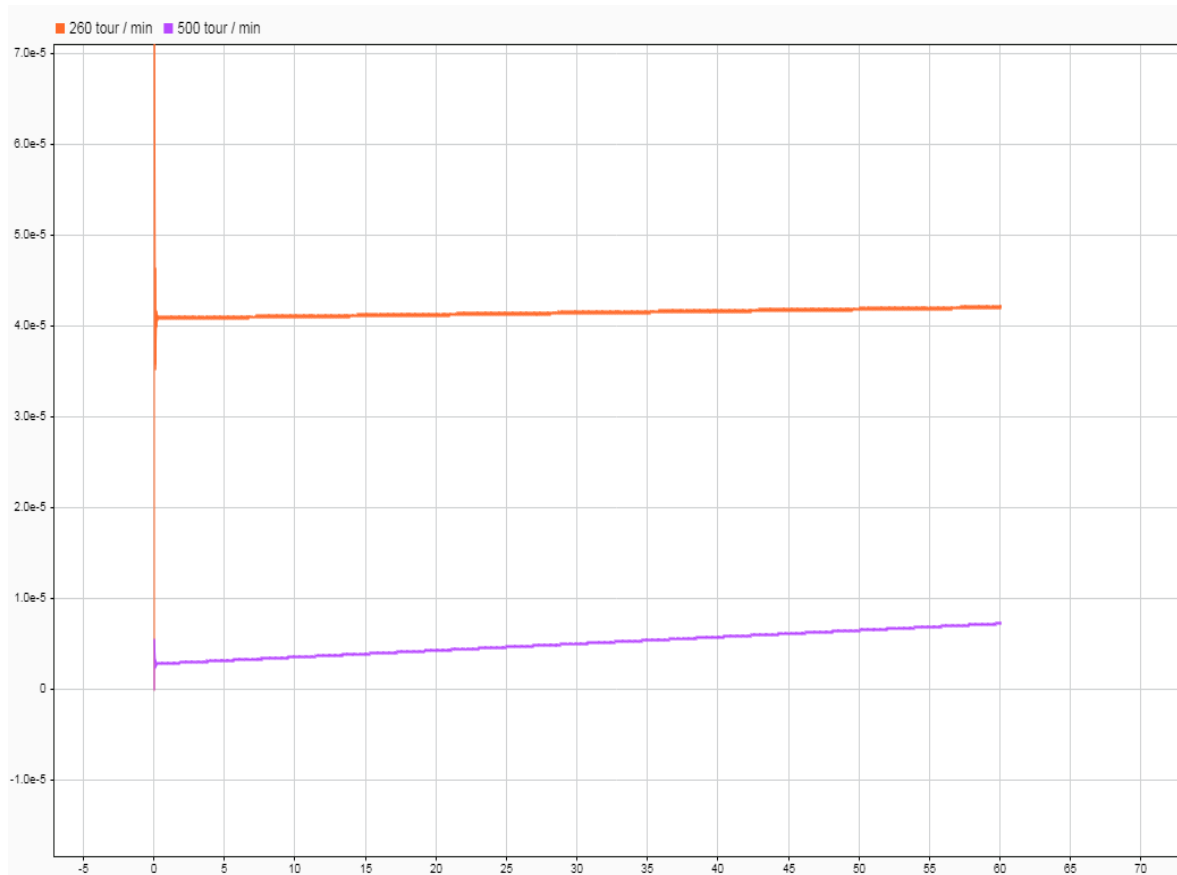


Figure III.61 – Comparaison entre les graphes du cas de défaut dans le rouleau

On remarque que pour $n = 260 \text{ tour/min}$ les amplitudes dans le régime stationnaire sont quasiment supérieur à celle de $n = 500 \text{ tour/min}$, et cela est dû à la différence de rigidité entre les deux cas car le déplacement augmente avec la diminution de la rigidité et vice-versa, mais d'une autre part le taux d'augmentation du graphe de 500 tour/min est supérieur de celle du 260 tour/min car plus la vitesse est grande la détérioration de la butée sera plus vite.

Ce qui suit des cases sont juste de combinaison des **4 précédents cases** (lubrifiée, défaut de cage, défaut d'anneau et défaut de rouleau) et l'allure générale du graphe est la même mais avec zoom ça change comme suit :

III.3.6.6. Butée avec lubrification et un défaut dans la cage et l'anneau

Ces graphes pour **260 et 500 tour/min** résultants de la combinaison de défaut de cage et de l'anneau, donc implicitement les fréquences qui appartiennent à chaque anomalie existent.

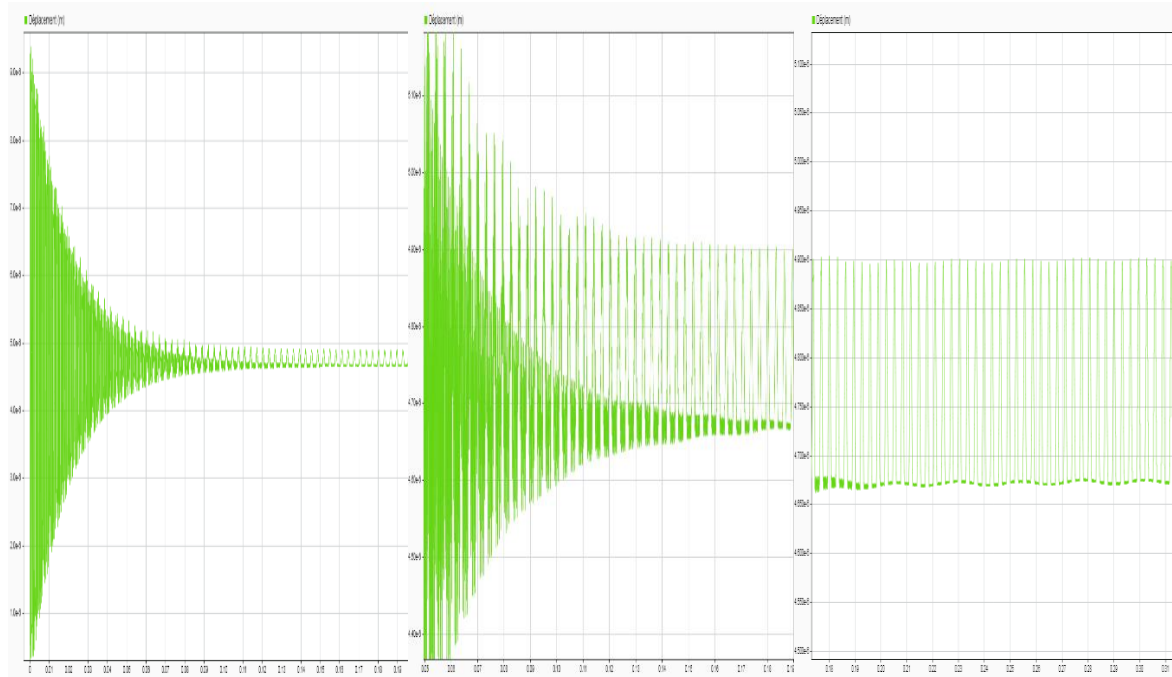


Figure III.62 – Butée avec lubrification et un défaut de cage et anneau pour 260 tour/min

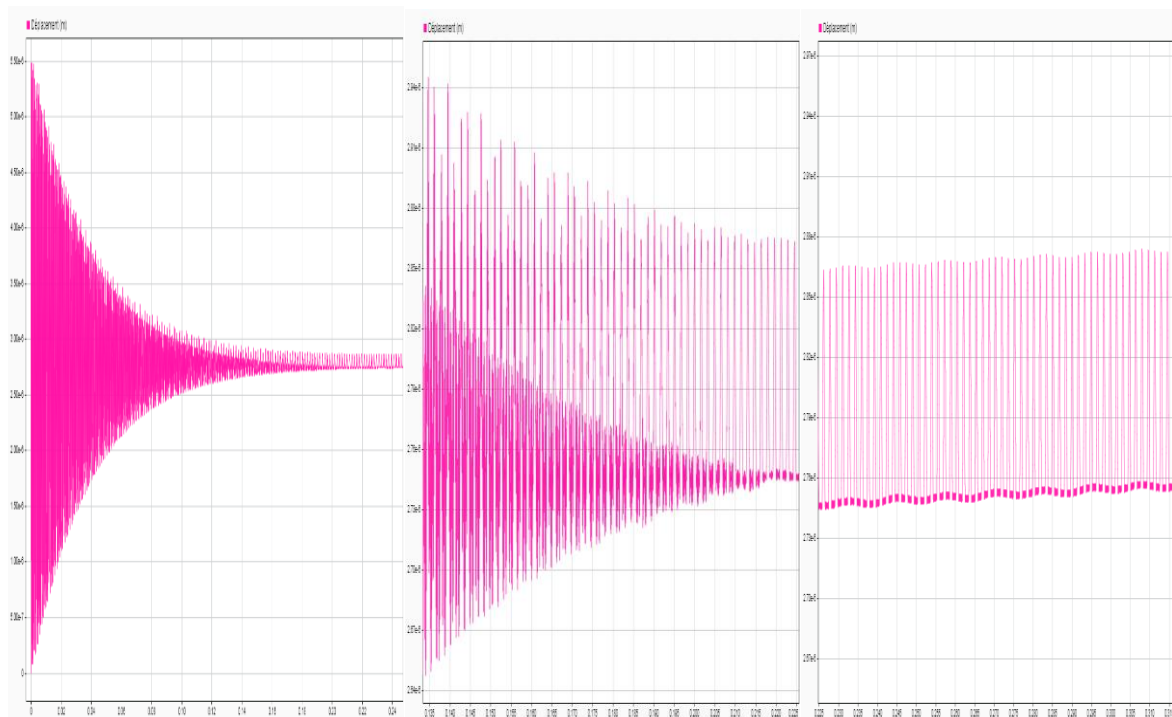


Figure III.63 – Butée avec lubrification et un défaut de cage et anneau pour 500 tour/min

III.3.6.7. Butée avec lubrification et un défaut dans la cage et le rouleau

Même chose pour ce cas aussi les fréquences des défauts combinés sont implicitement planter dans les graphes suivant :

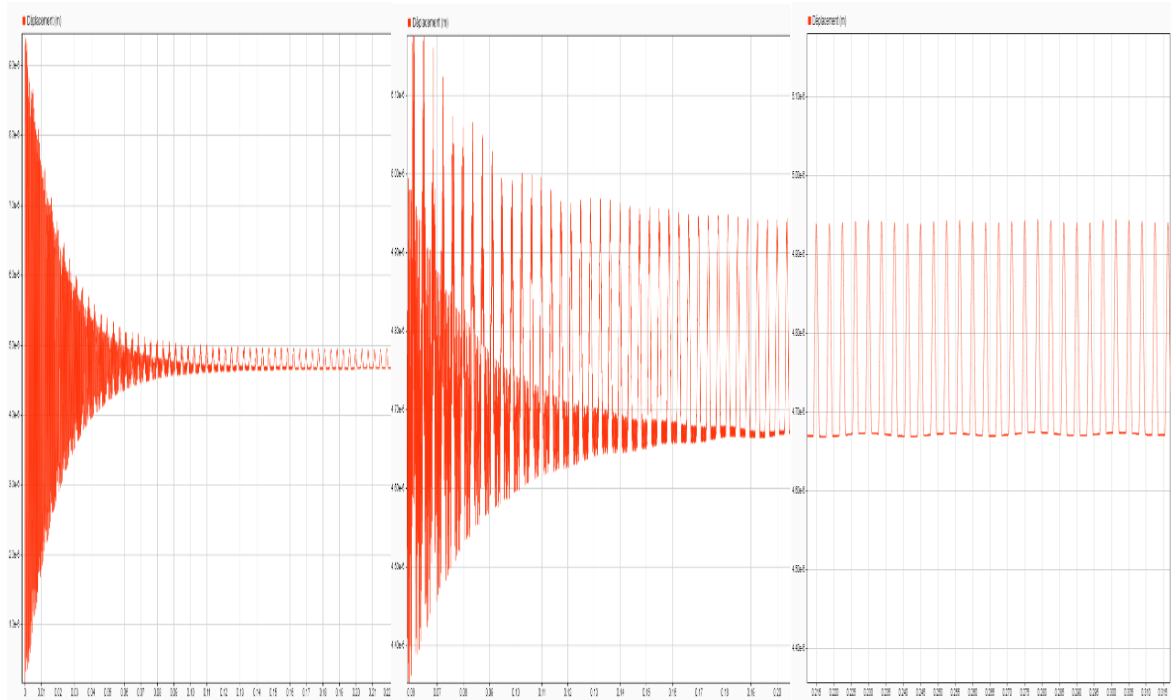


Figure III.64 – Butée avec lubrification et un défaut de cage et rouleau pour 260 tour/min

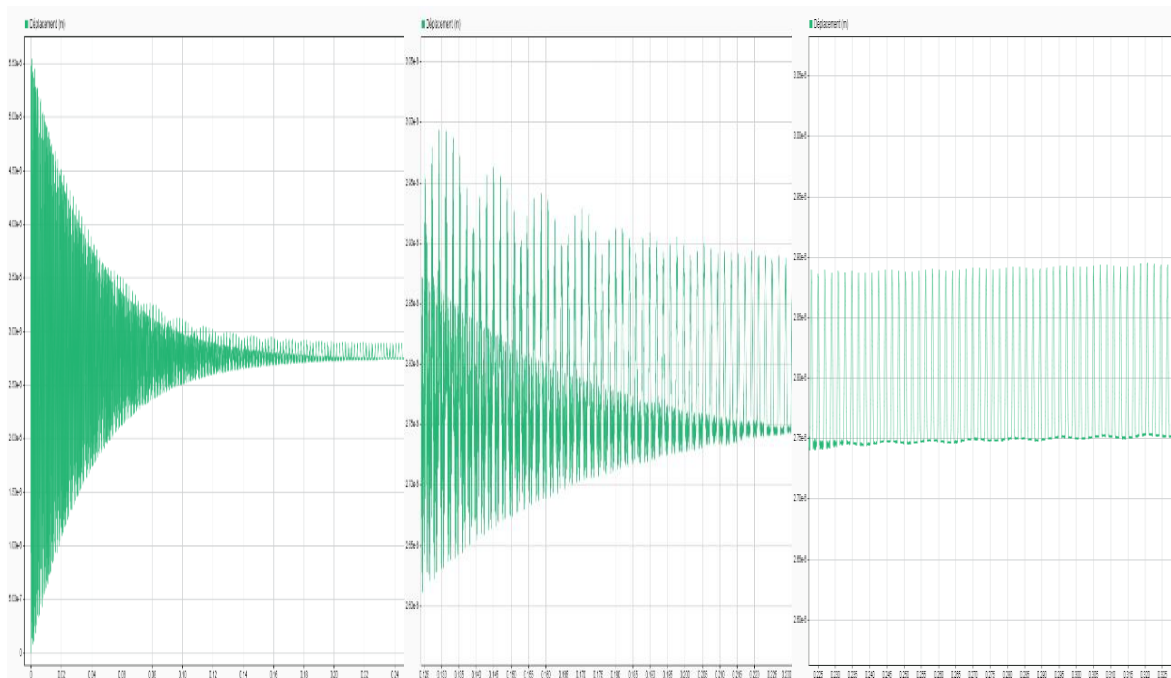


Figure III.65 – Butée avec lubrification et un défaut de cage et rouleau pour 500 tour/min

III.3.6.8. Butée lubrifiée avec défaut dans l'anneau et le rouleau

Pour des vitesses de 260 et 500 tour/min on a :

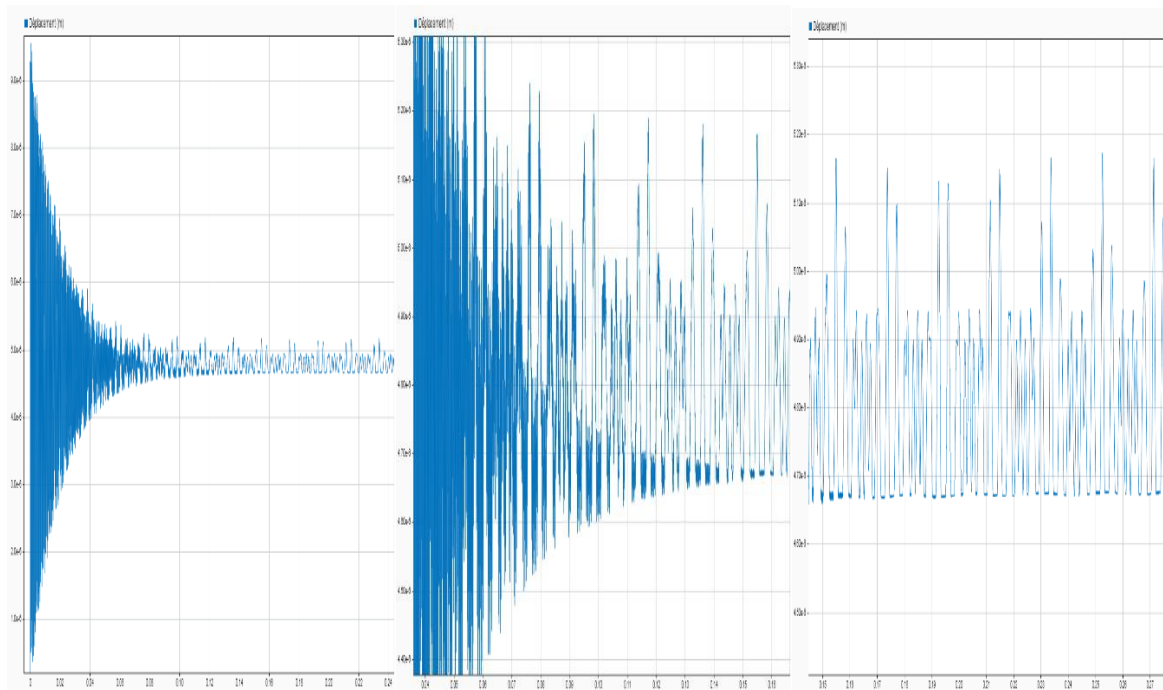


Figure III.66 – Butée lubrifiée avec un défaut d'anneau et de rouleau pour 260 tour/min

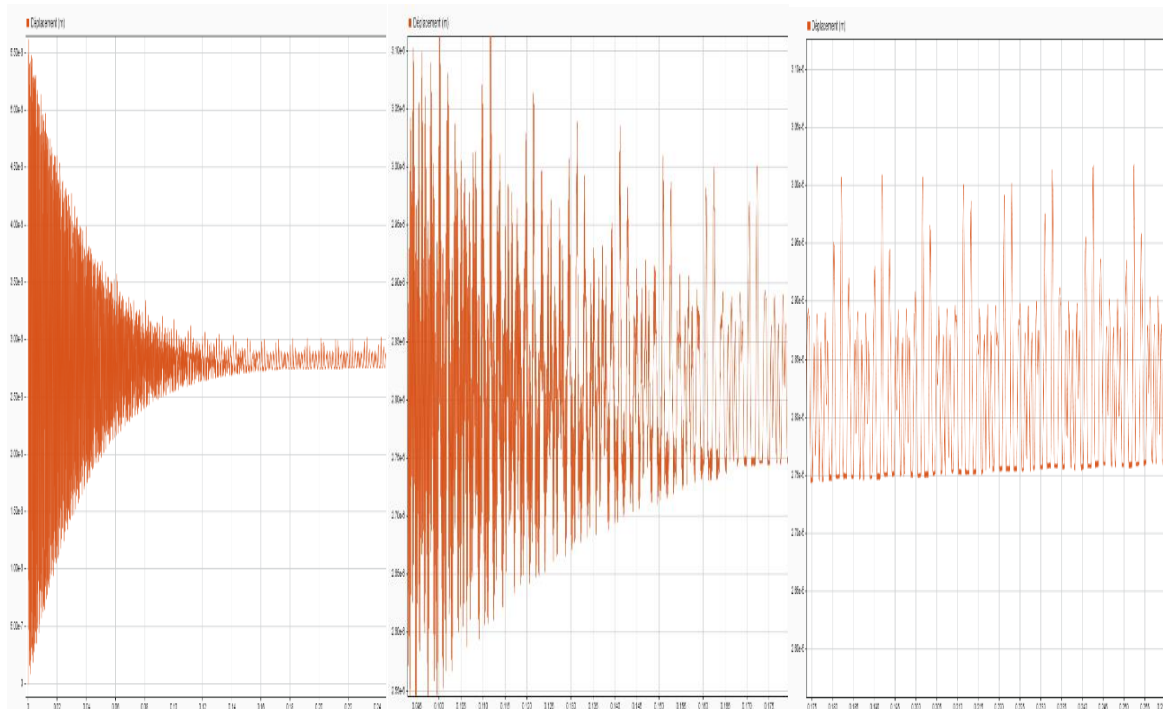


Figure III.67 – Butée lubrifiée avec un défaut d'anneau et de rouleau pour 500 tour/min

III.3.6.9. Butée lubrifiée avec défaut dans la cage, l’anneau et le rouleau

Pour une butée lubrifiée avec défailtante dans la cage, l’anneau et rouleau et pour 2 vitesses de 260 tour/min et 500 tour/min on a :

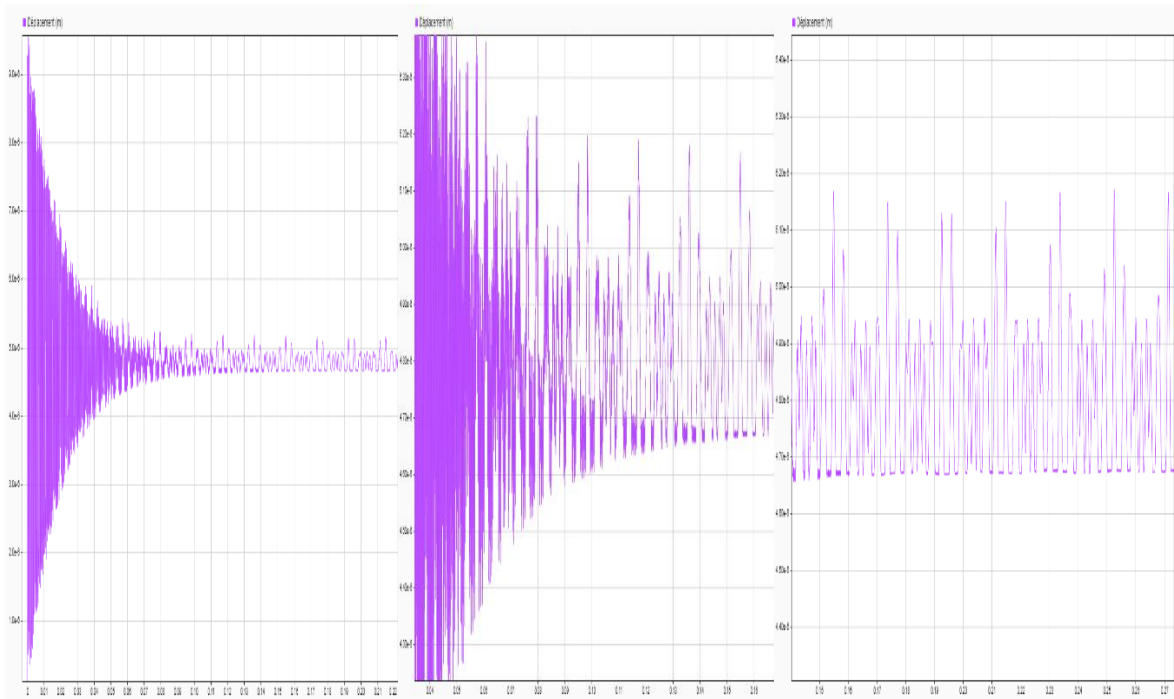


Figure III.68 – Butée avec un défaut dans la cage, l’anneau et le rouleau pour 260 tour/min

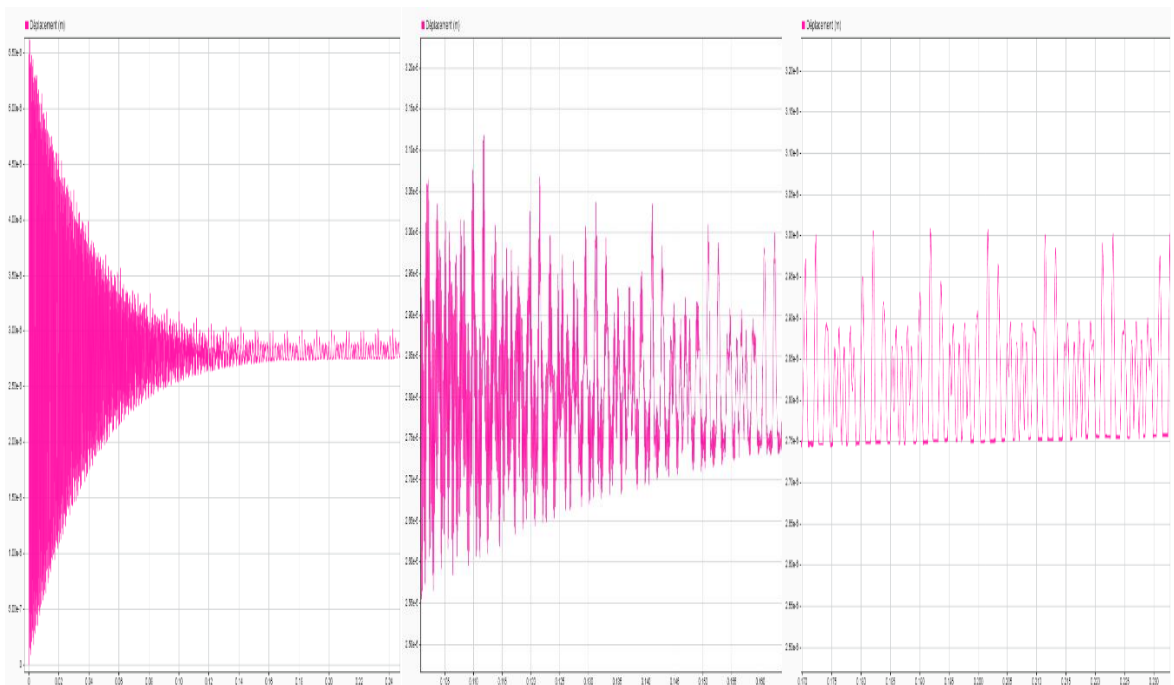


Figure III.69 – Butée avec un défaut dans la cage, l’anneau et le rouleau pour 500 tour/min

CHAPITRE III Description du TD CANRIG 1050E-500, et sa maintenance basée sur une simulation.

Les graphes précédents issus de la simulation des cas combinés qui englobent plusieurs défauts sont en réalité faiblement probables et même si ces cas existent, il nous suffit juste l'apparition d'un seul défaut pour arrêter le processus de forage afin d'intervenir dans le top drive, mais pour des raisons d'intelligence artificielle et pour le bon apprentissage du système intelligent, on a besoin d'une multitude de données afin de balayer tous les cas possible.

Conclusion

Les résultats obtenus par la simulation élaborée sont largement suffisants pour le contrôle humain, car il suffit juste de comparer chaque graphe réel issue des capteurs de vibration placés pour l'analyse vibratoire de la butée, en prenant compte les conditions identiques de vitesse de rotation avec celui de notre cas référence (butée lubrifiée sans défauts), en faisant une superposition des cas réel avec nos différents cas on peut même déduire l'état de la butée et avoir une idée sur le type de ces défauts.

Avec les efforts fournis, on constate que le taux de manifestation des défaillances sous le contrôle humain demeure élevé, donc on a besoin d'un système qui peut à la fois remplacer l'intelligence humaine d'une façon satisfaisante, et en même temps assurer la précision et la sensibilisation au moindre changement des paramètres puisque on a affaire à des micro-déplacements. C'est pour cela, on propose dans le prochain chapitre une étude basée sur les techniques de l'intelligence artificielle dont l'objectif est le contrôle de l'état de santé de la butée.

Chapitre IV

**Surveillance automatique
d'état de la butée BFS-8033
par l'IA**

Introduction

D'après les vibrations élaborées par la simulation dans le chapitre précédent, on peut faire un bon diagnostic sur l'état du matériel, comprenant les problèmes survenant des différents défauts,

Pour améliorer la précision du diagnostic, et avoir une puissance de détection des défauts dans le cas des petites vibrations et aussi pour éviter toutes erreurs causées par les opérateurs surveillant ces matériels, on inclut les modèles d'Intelligence Artificielle (**IA**) dans un système de surveillance automatique.

Dans la première partie de ce chapitre on va introduire les concepts principaux sur Le **Machine Learning (ML)**, avec ses algorithmes d'apprentissage, les différentes types et architectures des réseaux des neurones artificiels (**ANN**). Puis dans la deuxième partie à l'aide des algorithmes de **ML** et les réseaux des neurones, on va exploiter les données obtenues par la simulation de la butée **BFS-8033** ; Pour avoir un diagnostic sur l'état du matériel plus précis que le contrôle traditionnel dans la fonction maintenance.

IV.1. L'Apprentissage Automatique (Machine Learning)

L'apprentissage automatique, ou **Machine Learning (ML)** est une branche de l'intelligence artificielle (**IA**), qui se fonde sur des approches mathématiques et statistiques (Algorithmes) pour donner aux ordinateurs la capacité d'apprendre à partir des données ; ces derniers cherchent les paramètres de modèle qui minimisent l'erreur [42].

Ces algorithmes de **Machine Learning** ne savent rien faire dans la première phase ; puis, au fur et à mesure qu'ils s'entraînent sur des données, ils sont capables de répondre de plus en plus efficacement à la tâche qu'on leurs demande de faire [42].

Il présente plusieurs types d'apprentissage, les plus utilisés sont :

a. L'apprentissage Supervisée

Consiste en l'introduction de plusieurs données (**Labels**) déjà définies et étudiés par le Data Scientiste ; Pour la première phase, le réseau apprend ces échantillons en minimisant l'erreur entre la sortie désirée et celle obtenue, vient ensuite la deuxième phase où le réseau prédit la sortie selon ce qu'il a appris auparavant.

Les applications de l'Apprentissage Supervisé sont très nombreuses, les plus utilisées sont : régressions et classifications [42].

b. L'apprentissage Non – Supervisée (Clustering)

Dans cet apprentissage, l'algorithme ne possède pas d'étiquettes (**Unlabeled**), qui ne sont pas entraînés par le **Data scientist**, il va essayer de les supposer et procéder par regroupement en cherchant les données similaires.

Il est utilisé lorsqu'on ne sait pas ce que qu'on cherche, où la réponse à la tâche est inconnue pour les données [42].

IV.1.1. Les Algorithmes d'apprentissage de ML

Les techniques d'apprentissage ont joué un rôle crucial dans des applications des algorithmes d'apprentissage automatique à divers domaines, notamment le traitement du langage naturel et de la parole, la reconnaissance de l'écriture manuscrite, la vision robotisée, la fouille de données, les moteurs de recherche sur Internet, le diagnostic médical, la bio-informatique, etc. Le choix d'un algorithme dépend fortement de la tâche à résoudre (classification, estimation de valeurs...), du volume et de la nature des données [52].

IV.1.1.1. Support Vector Machine (SVM)

Il est très efficace dans les problèmes de classification, une machine à vecteurs de support ou séparateurs à vaste marge consiste à construire un hyperplan qui sépare les données linéairement séparables en deux classes. Une bonne séparation est obtenue par l'hyperplan qui est le plus éloigné des points les plus proches de chacune des deux classes, comme illustré en Figure IV.2 [52].

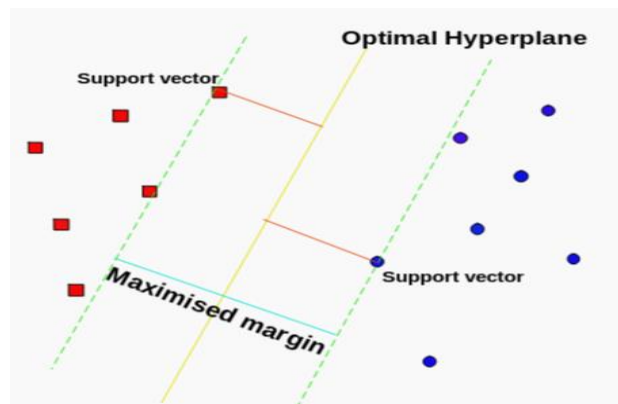


Figure IV.1 – Optimale Hyperplan Support Vector Machine [52]

Dans le cas des données d'entraînement qui ne sont pas linéairement séparables, il est proposé de transformer l'espace initial de représentation des données d'entrée en un espace de plus grande dimension (appelé espace de redescription), ce qui favorise la séparabilité linéaire dans ce nouvel espace, comme l'illustre la Figure IV.2. Cette transformation d'espace est appelée **astuce du noyau** [52].

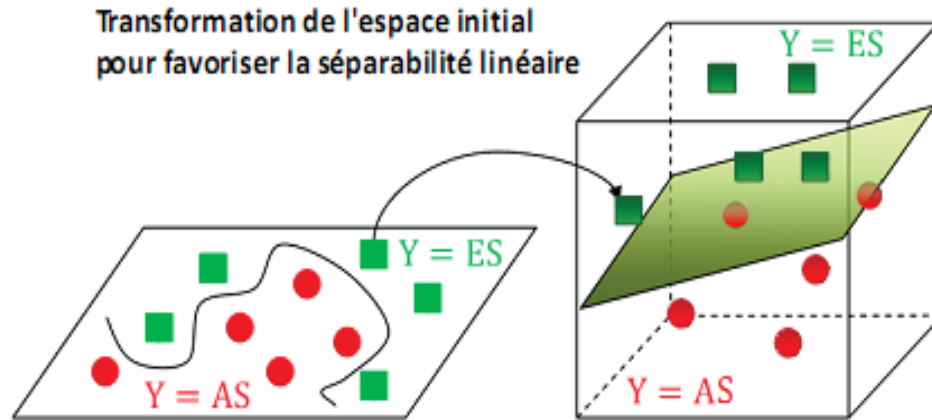


Figure IV.2 – SVM : Illustration de la transformation de l'espace initial [52].

Comme pour les réseaux de neurones, les **SVM** fournissent un modèle de type boîte noire qui ne permet aucune description facilement interprétable de la manière dont les variables d'entrée affectent la variable de sortie. Selon les données, la performance des machines à vecteurs de support est de même ordre, ou même supérieure à celle du **ANN** [52].

IV.1.1.2. Arbre de décision (Decision Tree)

L'objectif est de créer un modèle qui prédit la valeur d'une variable cible en apprenant des règles de décision simples déduites des caractéristiques des données. Un arbre peut être considéré comme une approximation constante par morceaux [43].

Ces arbres n'ont que deux composantes :

- Les nœuds de branchement, qui représentent une seule variable d'entrée et offrent un seul point de partage sur la variable.
- Les nœuds feuillents, qui représentent les deux variables de sortie [53].

- Exemple : Est-ce que les conditions sont favorables pour jouer au tennis?

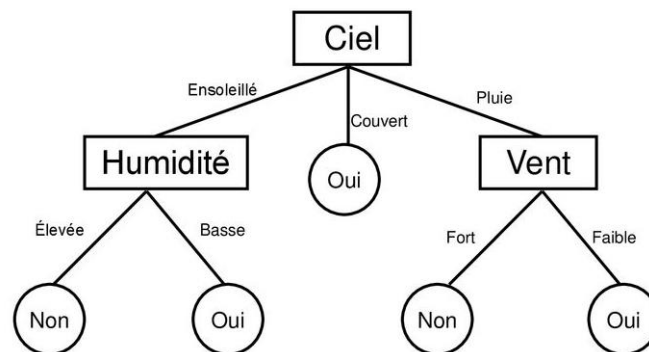


Figure IV.3 - Exemple d'arbre de classification [53].

Les Arbres de décision sont faciles à apprendre et à utiliser, et précis pour toute une gamme de problèmes. Celles-ci sont particulièrement rapides à mettre en œuvre car les données ne nécessitent aucune préparation particulière [53].

Le **Random Forest** (forêt aléatoire) est un algorithme de **ML** utilisée pour résoudre les problèmes de régression et de classification, qui se compose de plusieurs arbres de décision.

L'algorithme de **RF** établit le résultat sur la base des prédictions des arbres de décision. Il prédit en prenant la moyenne ou les moyennes des résultats de plusieurs arbres. L'augmentation du nombre d'arbres accroît la précision du résultat. Le RF élimine les limites d'un algorithme d'arbre de décision. Il réduit l'**Overfitting** des ensembles de données et augmente la précision [43].

IV.1.1.3. XG Boost Classificateur

L'algorithme **XGBoost** ou **Extreme Gradient Boosting** est un algorithme d'apprentissage automatique (**ML**) basé sur un arbre de décision qui utilise un processus appelé **boosting** pour améliorer les performances. Depuis son introduction, il est devenu l'un des algorithmes d'apprentissage automatique les plus efficaces et produit régulièrement des résultats qui surpassent la plupart des autres algorithmes, tels que la régression logistique, le modèle de forêt aléatoire (**Random Forst**) et les arbres de décision ordinaires.

Il peut être utilisé pour résoudre les problèmes de classification et de régression, et convient donc à la grande majorité des problèmes de science des données [50].

IV.1.1.4. K- Nearest Neighbors (KNN)

L'algorithme KNN qui signifie K-voisins les plus proches, il utilise l'intégralité du data set en tant qu'entraînement.

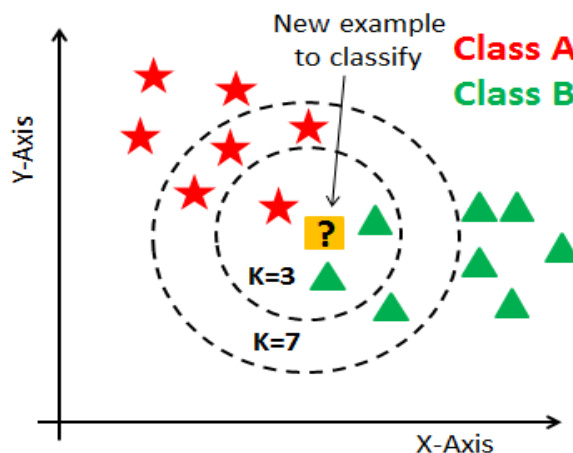


Figure IV.4 – Algorithme de KNN [53]

Quand un résultat est requis pour une nouvelle instance de données, l'algorithme **KNN** parcourt l'intégralité du data set pour rechercher les k-instances les plus proches de la nouvelle instance ou le nombre k d'instances les plus similaires au nouvel enregistrement, puis renvoie la moyenne des résultats ou le classe à laquelle appartient cette instance si c'est un problème de classification. L'utilisateur spécifie lui-même la valeur de k [53].

IV.1.1.5. La régression

Le concept général de la régression est d'étudier un ensemble de variables prédictives qui permet de prédire une variable de résultat, et citer les variables les plus significatives qui ont le plus d'impact sur la variation de résultat.

La régression linéaire est l'un des algorithmes d'apprentissage supervisé les plus populaires, il est un type d'analyse prédictive de base [53].

Les prévisions de régression logistique sont des valeurs discrètes, contrairement aux prédictions de régression linéaire, qui sont des valeurs continues. C'est-à-dire un ensemble fini de valeurs. La régression convient mieux à la classification binaire.

Au contraire de la régression linéaire, la régression logistique, propose le résultat sous forme de probabilités de la classe par défaut. Le résultat appartient donc à l'intervalle [0 :1].

La valeur y de sortie est générée par la transformation de la valeur x, à l'aide de la fonction logistique (Sigmoid) [53].

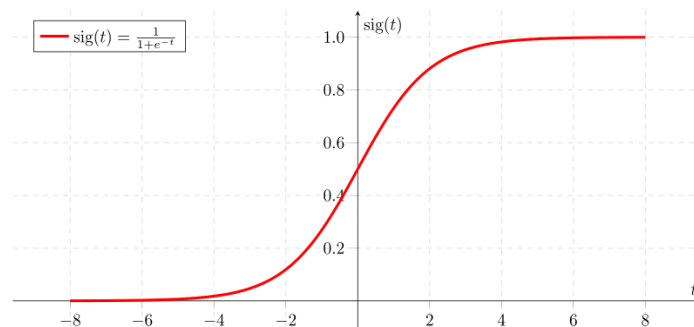


Figure IV.5 – La Fonction logistique sigmoïde [53]

IV.1.2. Le Sur-apprentissage (Overfitting)

Le Sur-apprentissage parfois appelé "sur-entraînement" ou "sur-ajustement" est le fait de construire un modèle de prévision trop spécifique, qui correspond trop étroitement ou exactement à un ensemble particulier de données, et qui n'est pas en mesure de s'adapter facilement à des nouvelles données d'entrée ou de prédire des observations futures de manière

fiable. Il y a sur-ajustement lorsqu'un modèle commence à "mémoriser" les données d'apprentissage plutôt qu'à "apprendre" à généraliser une tendance observée dans les données d'apprentissage [52].

Le risque de sur-ajustement dépend non seulement du grand nombre d'échantillons à apprendre, ou bien au grand nombre de couches cachées, mais aussi de la conformité de la structure du modèle avec celle des données et de l'ampleur de l'erreur du modèle par rapport au niveau de bruit ou d'erreur contenu dans les données [52].

IV.2. L'apprentissage profond (Deep Learning)

Le **Deep Learning (DL)** est une branche de l'intelligence artificielle s'est développée pour objectif de la simulation des comportements du cerveau humain ou bien dits les neurones.

Le réseau des neurones artificiels (**Artificiel Neural Network : ANN**) s'inspire du traitement de l'information effectué par le cerveau humain, consiste à développer un algorithme d'apprentissage qui traite un ensemble d'informations pour obtenir un résultat [51].

Le réseau des neurones artificiels (**ANN**) est une structure en couches capable d'apprendre à partir des données d'entrées (apprentissage), et trouver la corrélation que n'est pas visible pour les humains. Ils offrent des solutions très performantes pour le diagnostic et pronostic des procédés industriels. Ils ont de propriété d'intégration avec plusieurs branches de différents secteurs, et ce grâce à sa capacité à résoudre pas mal de problèmes [42].

IV.2.1. Pourquoi le Deep Learning ?

Les **ANNs**, contrairement aux techniques classiques de classification, ne nécessitent aucune hypothèse sur les variables et ils sont tout à fait adaptés pour des problèmes complexes non structurés [51].

Il est bien connu que ces modèles traditionnels de **Machine Learning** présentent de nombreuses limites :

- ☞ Les valeurs manquantes peuvent réellement affecter les performances des modèles ;
- ☞ Ils ne sont pas capables de reconnaître des modèles complexes dans les données ;
- ☞ Ils ne fonctionnent généralement bien que dans les prévisions à quelques étapes, pas dans les prévisions à long terme.
- ☞ Leurs performances sont insatisfaisantes avec des données volumineuses [50].

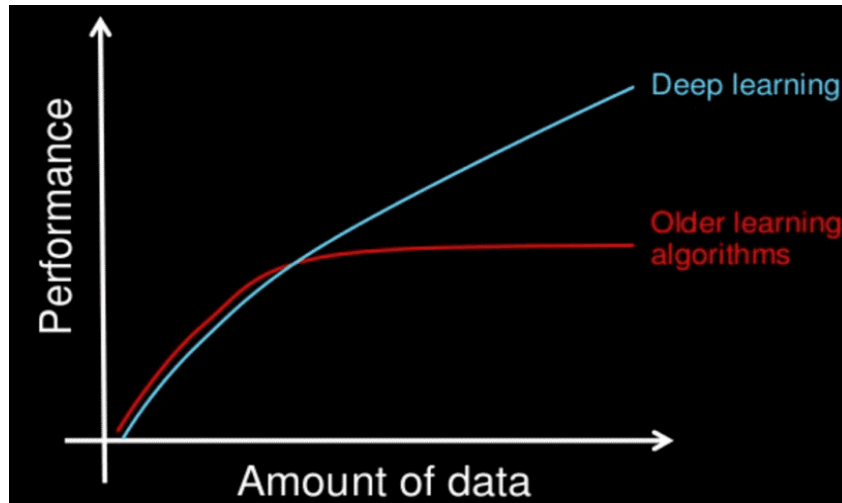


Figure IV.6 – Performance de ML et DL par rapport la quantité des données [50].

IV.2.2. La structure et le fonctionnement du ANN

Un réseau de neurones artificiel est une combine des plusieurs neurones formels fonctionnant en parallèle et inspirés par des systèmes nerveux biologiques. Il se compose d'une couche d'entrée, d'une ou de plusieurs des couches cachées, et d'une couche de sortie.

Dans chaque couche, il y a plusieurs nœuds ou neurones, chaque couche utilisant la sortie de la couche précédente comme entrée, alors les neurones interconnectent les différentes couches. Chaque neurone a généralement des poids qui sont ajustés pendant le processus d'apprentissage, et comme le poids diminue ou augmente, il change la force du signal de ce neurone.

Chaque neurone d'une couche a des poids ajustables pour ses entrées et un biais ajustable. Un réseau de neurones fonctionne (est entraîné) en ajustant tous ces poids et biais et en minimisant l'erreur tout au long de la phase d'entraînement pour obtenir des résultats plus précis.

IV.2.2.1. Les principales composantes du réseau de neurones

- a. Les neurones :** Les neurones d'entrée reçoivent des données d'entrée, les traitent et les transmettent aux neurones dans la couche suivante. Les neurones cachés prennent les données de sortie des précédents neurones en entrée, calculent de nouvelles données de sortie et les transmettent à des couches successives. Les neurones de la dernière couche cachée (**hidden layer**) transmettent les données de sortie en entrée des neurones de la couche de sortie (**output layer**). A partir de cela les neurones de la couche de sortie produisent les données de sortie finales [40].

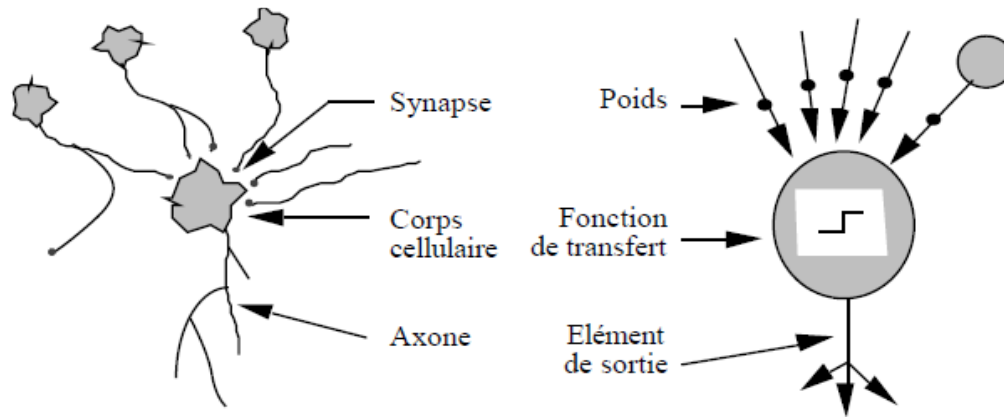


Figure IV.7 – Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel [40]

Le neurone formel est une formulation mathématique simplifiée de neurone biologique.

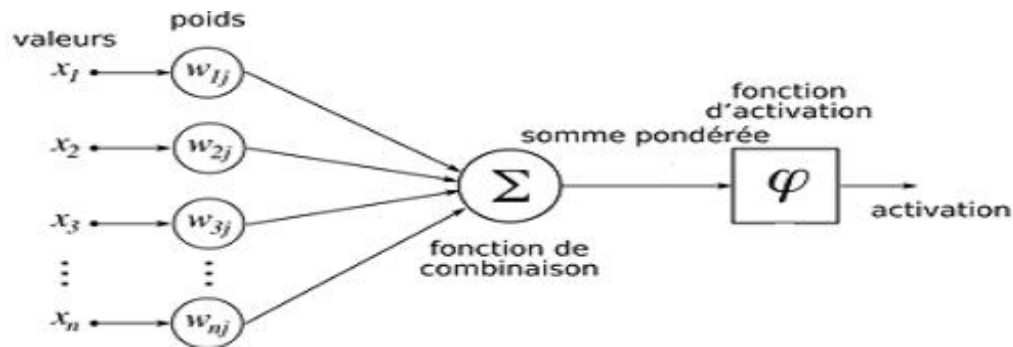


Figure IV.8 – Structure d'un neurone artificiel [51]

Un neurone j calcule un potentiel P_j , égal à la somme de ses entrées (inputs) (x_1, x_2, \dots, x_n) pondérées, par les coefficients synaptiques (poids) respectifs (w_1, w_2, \dots, w_n), à laquelle on ajoute un terme constant : le biais b_j .

La valeur du potentiel P_j est donnée par l'équation suivante :

$$P_j = \sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + b_j \quad (\text{IV.1})$$

A ce potentiel, le neurone applique une fonction d'activation Φ , de manière à ce que la sortie y_j , calculée par le neurone, soit égale à $\Phi(P_j)$, tel que :

$$y_j = \Phi(P_j) = \phi(\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + b_j) \quad (\text{IV.2})$$

L'utilisation du biais est de nature à appliquer une transformation affine au potentiel. En fait, le biais est un paramètre externe du neurone j , il peut être intégré dans l'équation du potentiel,

comme étant le signal x_0 qui prend la valeur 1, pondéré par le poids w_{0j} , dont la valeur est égale au biais b_j .

La valeur de sortie y_j (output) est émise par le neurone vers d'autres neurones ou vers l'extérieur. Ainsi, un neurone est caractérisé par trois concepts : son état interne c'est-à-dire son potentiel, ses connexions avec d'autres neurones et sa fonction de transfert [51].

b. Couches (Layers) : Les couches (ou **layers**) contiennent des neurones et aident à faire circuler l'information. Il existe au moins deux couches dans un réseau de neurones : la couche d'entrée (**input layer**) et la couche de sortie (**output layer**), et aussi la ou les couche cachées (ou **hidden layers**).

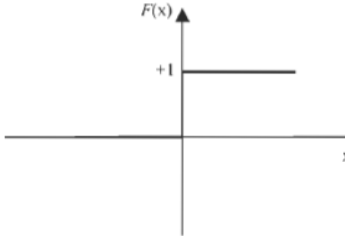
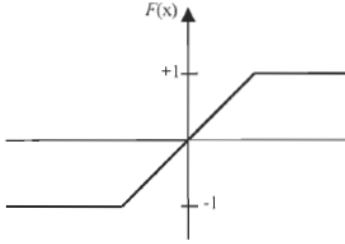
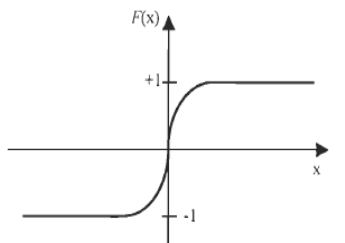
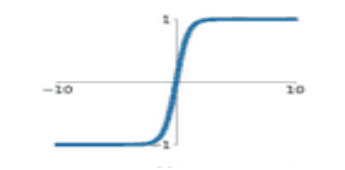
Il est tout à fait possible d'avoir un grand nombre de couches dans un réseau de neurones complexe. Plus, il y aura de couches, plus le réseau sera profond (**Deep Learning**) [40].

c. Poids et Biais (Weights and Bias) : Les poids sont des variables du modèle qui sont mises à jour pour améliorer la précision du réseau. Un poids est appliqué à l'entrée de chacun des neurones pour calculer une donnée de sortie. Les réseaux de neurones mettent à jour ces poids de manière continue. Il existe donc une boucle de rétroaction mise en œuvre dans la plupart des réseaux de neurones. Les biais sont également des valeurs numériques qui sont ajoutées une fois que les poids sont appliqués aux valeurs d'entrée. Les poids et les biais sont donc en quelque sorte des valeurs d'auto-apprentissage de nos réseaux de neurones [40].

d. Fonction d'activation (ou de transfert)

C'est l'algorithme mathématique appliqué aux valeurs de sortie ; Les fonctions d'activation lissent ou normalisent la donnée de sortie avant qu'elle ne soit transmise aux neurones suivants. Ces fonctions aident les réseaux de neurones à apprendre et à s'améliorer [40].

Les fonctions d'activation introduisent la non-linéarité dans les réseaux de neurones, nécessaire pour résoudre des problèmes complexes. Il existe plusieurs fonctions d'activation, on les résume dans ce tableau ci-dessous Tableau IV.1 :

Fonctions d'activation Relation Entrée/Sortie	Description de la fonction	Représentation graphique
<p>Fonction binaire à seuil</p> <p>$a = 0$ si $n < 0$</p> <p>$a = 1$ si $n \geq 0$</p>	<p>C'est le modèle tout ou rien.</p> <p>Une entrée négative ne passe pas le seuil et une entrée positive ou nulle, dépasse le seuil et la fonction retourne 1</p>	
<p>Linéaire saturée symétrique</p> <p>$a = -1$ si $n < -1$</p> <p>$a = n$ si $0 \leq n \leq 1$</p> <p>$a = 1$ si $n > 1$</p>	<p>Cette fonction représente un compromis entre la fonction linéaire et la fonction seuil :</p> <p>Entre ses deux bornes, elle confère au neurone une combinaison linéaire de l'entrée. À la limite, la fonction linéaire est équivalente à la fonction seuil.</p>	
<p>Sigmoïde</p> $\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	<p>Une fonction continue qui maintient la sortie dans l'intervalle [0,1].</p> <p>Son avantage principal est l'existence de sa dérivée en tout point. Elle est employée en général dans le perceptron multicouche.</p>	
<p>Tangente hyperbolique (tanh)</p> <p>$Tanh(x)$</p>	<p>Il s'agit d'une fonction supérieure comparée à Sigmoid. Cependant, elle rend moins bien compte des relations et elle est plus lente à converger.</p>	

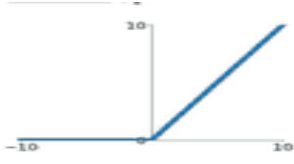
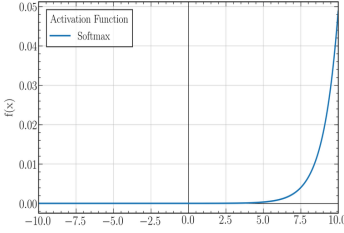
<p>Unité linéaire rectifiée (ReLU)</p> <p>$Max(0,x)$</p>	<p>Cette fonction converge plus rapidement et ça permet un entraînement plus rapide et plus efficace ; en mappant les valeurs négatives à zéro et en maintenant les valeurs positives.</p>	
<p>Softmax</p> <p>$\sigma(z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^K e^{z_j}}$</p> <p>$i(1, \dots, K)$ et $z=(z_1, \dots, z_K)$</p>	<p>Utilisé dans la couche de sortie car il réduit les dimensions et peut représenter une distribution catégorique.</p>	

Tableau IV.1 – Les fonctions d'activation du ANN

IV.2.3. Types et architectures des réseaux de neurones artificiels

Les ANNs se manifestent sous forme de plusieurs architectures :

IV.2.3.1. Perceptron monocouche (un seul neurone)

Le perceptron (Rosenblatt 1958) est la forme la plus simple d'un réseau de neurones. Il se compose d'une couche d'entrée et une couche de sortie. Ce réseau est capable de résoudre des problèmes linéairement séparables (ex : fonction logique 'OU' ou 'AND') ; à noter que tous les neurones de la couche d'entrée sont liés à tous les neurones de sortie (Figure IV.9) [42].

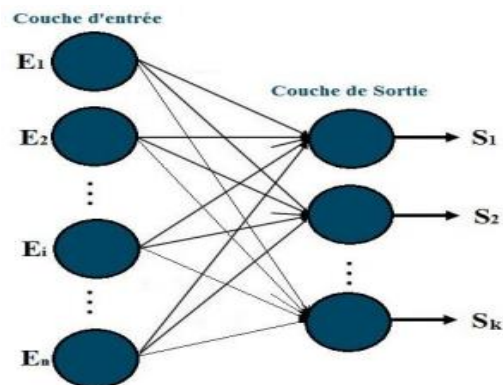


Figure IV.9 – Le Perceptron : structure et comportement [42]

IV.2.3.2. Multi Layer Perceptron (MLP)

Le Perceptron Multicouche ou bien le réseau entièrement connecté (**Fully Connected**) est le réseau plus populaire dû à sa capacité de résoudre pas mal des problèmes.

Il contient des couches cachées entre la couche d'entrée et celle de sortie, ce réseau résout des problèmes non-linéairement séparables, et là aussi, chaque neurone des couches cachées est connecté à tous les neurones de la couche qui la précède et celle qui la suit. Le vecteur d'entrée se propage dans le réseau de couche en couche jusqu'à la sortie, l'entraînement de celui-ci se fait avec l'algorithme par la rétro-propagation de l'erreur.

Même avec les avantages des couches cachées et la performance de l'algorithme d'apprentissage, il reste plusieurs problèmes non réglés comme le choix du nombre de couches, le nombre de neurones par couche et le problème des minimums locaux où le réseau peut converger [42].

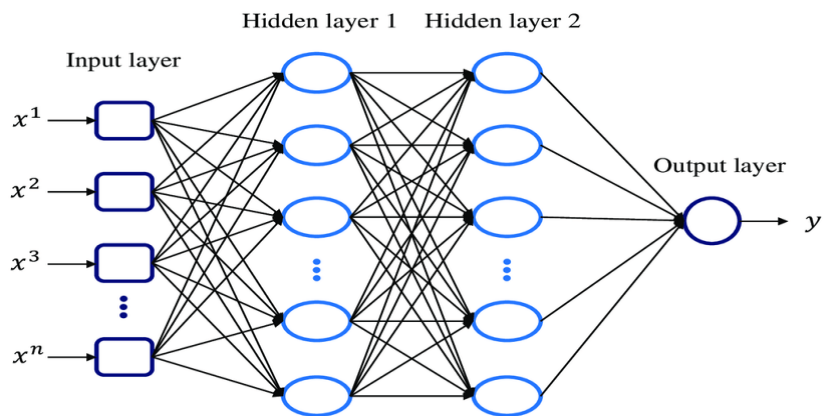


Figure IV.10 – MLP architecture avec deux couches cachées et une sortie [42]

IV.2.3.3. Réseau de neurones récurrent (Recurrent Neural Network)

Les réseaux de neurones récurrents (**RNN**) sont des réseaux de nœuds de type neurone organisés en couches successives, avec une architecture similaire à celle des réseaux de neurones standard. La différence est que dans ce cas, chaque neurone est affecté à un pas de temps fixe. Les neurones de la couche cachée sont également transmis dans une direction dépendante du temps, ce qui signifie que chacun d'entre eux est entièrement connecté uniquement aux neurones de la couche cachée avec le même pas de temps attribué et connecté avec une connexion à chaque neurone affecté au pas de temps suivant. Les neurones d'entrée et de sortie sont connectés uniquement aux couches cachées avec le même pas de temps assigné.

L'activation des neurones est calculée dans l'ordre temporel : à un pas de temps donné, seuls les neurones affectés à ce pas de temps calculent leur activation.

L’RNN conviennent aux applications où les informations historiques sont importantes. Ces réseaux nous aident à prévoir les séries chronologiques (**Time Series Forecasting**) dans les applications commerciales et à prévoir les mots dans les applications de type **chatbot** [41].

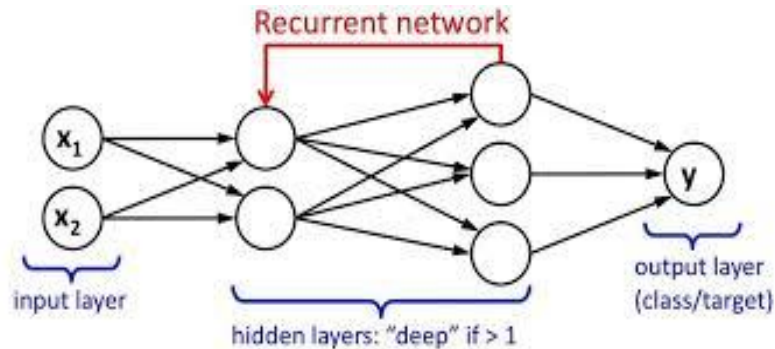


Figure IV.11 – Architecture simplifiée d’un réseau RNN [41]

Ils peuvent fonctionner avec différentes longueurs d’entrée et de sortie et nécessitent une grande quantité de données.

IV.2.3.4. Réseau de neurones de convolution (Convolution Neural Network)

Ces réseaux reposent sur des filtres de convolution (matrices numériques). Les filtres sont appliqués aux entrées avant que celles-ci ne soient transmises aux neurones.

Les CNN sont particulièrement utiles pour trouver des motifs dans les images afin de reconnaître des objets, des visages et des scènes. Ils peuvent également être très efficaces pour classer les données non-image telles que les données audio, les séries temporelles et les signaux.

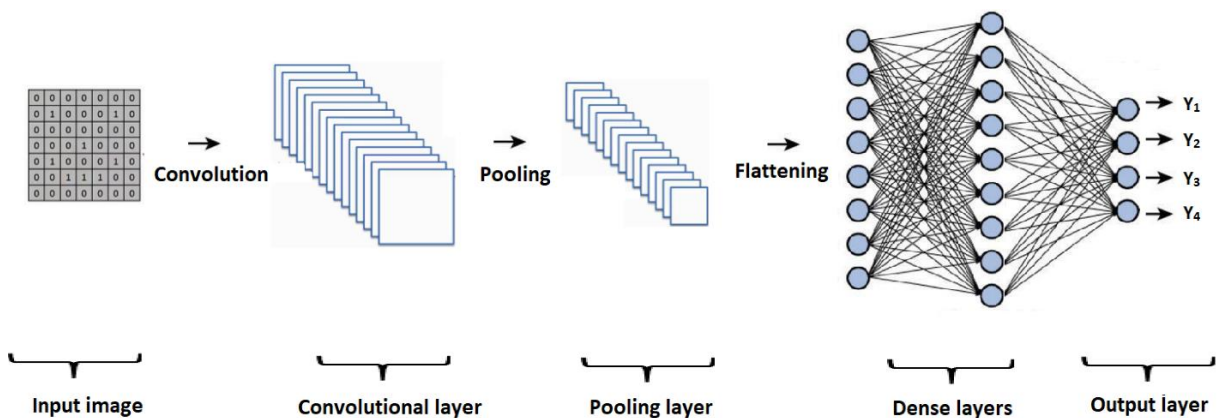


Figure IV.12 – Architecture de CNN avec des couches convolution et **pooling** [47]

Les applications qui font appel à la reconnaissance d'objets et à la vision par ordinateur, telles que les véhicules autonomes et les applications de reconnaissance faciale, reposent fortement sur les **CNN** [47].

IV.2.4. Apprentissage des réseaux des neurones artificiels

Les ANN sont généralement caractérisées par l'apprentissage, qui est la caractéristique principale des réseaux des neurones. On peut définir l'apprentissage comme la capacité d'emmagasiner des informations qui peuvent être rappelées par la suite.

Il est souvent impossible de décider a priori des valeurs des poids des connexions d'un réseau (**Weights**) pour une application donnée. Le but de l'apprentissage pour un réseau est de trouver un ensemble de poids synoptiques qui minimisent l'erreur entre la sortie du réseau et le résultat désiré [44].

IV.2.4.1. La Fonction de Coût (Loss Function)

Une fonction de coût (de perte) mesure la qualité et la performance d'un modèle de réseau neuronal, On mesure l'erreur entre un modèle et le **dataset** lors de l'étape de rétro-propagation et donc la machine trouve le meilleur modèle et ça se fait par les différents algorithmes d'optimisation [48].

a. Categorical Cross Entropy Loss

L'entropie croisée catégorique est une fonction de perte qui est utilisée dans les tâches de classification multi-classes. Ce sont des tâches où un exemple ne peut appartenir qu'à une des nombreuses catégories possibles, et le modèle doit décider laquelle, avec probabilité 1, et à d'autres catégories avec probabilité 0. Formellement, il est conçu pour quantifier la différence entre deux distributions de probabilité. Softmax est la seule fonction d'activation qu'il est recommandé d'utiliser avec cette fonction de perte [48].

b. Mean Square Error (MSE)

L'erreur quadratique moyenne (**MSE**) est la fonction de perte la plus couramment utilisée pour la régression. La perte est la moyenne des données supervisées des différences carrées entre les valeurs vraies et prédites, où l'écrivain comme formule :

$$L(y, \hat{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (y - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{IV.3})$$

Où \hat{y} est la valeur prédite [48].

c. Minimisation de la fonction Coût

L'algorithme de descente du gradient (**DG**) s'applique lorsqu'on cherche le minimum d'une fonction déterministe (la fonction de coût), qui est dérivable et dont le minimum reste difficile à trouver avec un calcul direct.

L'algorithme du gradient utilise la technique de rétro-propagation pour corriger les erreurs [42].

- **La propagation :** La propagation du signal d'entrée vers les sorties passant par les couches cachées s'effectue d'une couche à une autre, prenons l'exemple d'une architecture à une seule couche cachée, la première étape se fera suivant les relations suivantes :

$$R_j = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (E_i \times \omega_{ji}) \quad (\text{IV.4})$$

$$C_j = F(R_j) \quad (\text{IV.5})$$

Où :

I : Représente le nombre d'entrées.

J : Représente le nombre des neurones dans la couche cachée.

E_i : Représente l'entrée i du réseau.

ω_{ji} : Représente le poids liant le neurone de la couche cachée à l'entrée.

F : Représente la fonction d'activation.

C_j : Représente la sortie j de la couche cachée, et l'entrée j de la prochaine couche.

On a utilisé la fonction sigmoïde comme fonction d'activation, donc la Formule IV.5 pourra s'écrire ainsi :

$$C_j = \frac{1}{1+e^{-R_j}} \quad (\text{IV.6})$$

On répétera la même procédure et on utilisera les mêmes formules pour la propagation de la couche cachée vers les sorties.

$$R_j = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (E_i \times \omega_{ki}) \quad (\text{IV.7})$$

$$S_k = \frac{1}{1+e^{-R_k}} \quad (\text{IV.8})$$

Où :

K : Représente le nombre de sorties.

C_j : Représente l'entrée j de la couche de sortie.

ω_{ji} : Représente le poids liant la sortie k au neurone de la couche cachée j .

S_k : Représente la sortie k du réseau.

- **La rétro-propagation** : L'étape la plus importante consiste à minimiser l'erreur, qui est possédée donc un minimum, et dépend de ω , le but est donc de mettre à jour ces connexions (ω) afin de trouver l'erreur la plus minimale possible (minimum globale, figure ci-dessous). Ce calcul se fera inversement, c.à.d. des sorties vers les entrées [42].

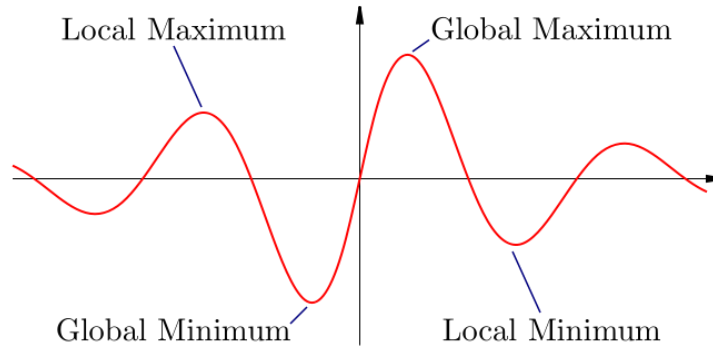


Figure IV.13 – Les positions des minimas et des maximas Globaux et Locaux [42].

IV.2.5. La Classification par le réseau des neurones

Les problèmes de classification impliquent de prédire une sortie de classe discrète. Cela implique de diviser l'ensemble de données en classes différentes et uniques en fonction de différents paramètres afin qu'un nouvel enregistrement invisible puisse être placé dans l'une des classes [54].

Le but de la classification des modèles (pattern classification) est d'attribuer les modèles d'entrée à l'un d'un nombre fini M des classes [45].

IV.3. La surveillance automatique de l'état de butée BFS-8033 par les modèles d'intelligence artificielle (IA)

L'application du de IA : **Machine Learning** ou **Deep Learning** pour le diagnostic automatique du matériel, se fait avec un model codée dans une plateforme de **Google Colabory**, ou **Anaconda Jupyter**.

Le procès de la construction du model passe par plusieurs étapes :

IV.3.1. Prétraitement des données (preprocessing of datas)

IV.3.1.1. Importation et préparation des données

D'abord, on charge les bibliothèques nécessaires : **Numpy**, **Pandas**, **matplotlib**, **seaborn**, **sklearn**, ... etc, afin que nous puissions appliquer les opérations mathématiques et algébriques,

lire et analyser les Data Frames, visualiser les données et l'esthétique et aussi pour inter-opérer avec les bibliothèques numériques et scientifiques de **NumPy** et **SciPy**.

☞ Après, on procède à l'importation de datas pour qu'ils soient par la suite :

```
# import the data
data_path = "Vibrations totale de la butée.xlsx"
df_total = pd.read_excel(data_path, engine="openpyxl")
```

Figure IV.14 – Importation des données

On affiche les premiers dix 10 lignes, et les trois premiers classes (3*3 colonnes) :

```
df_total.head(11)
```

	Temps 01	Déplacement 01	Classe 01	Temps 02	Déplacement 02	Classe 02	Temps 03	Déplacement 03	Classe 03
0	0.000000e+00	0.000000e+00	1	0.000000e+00	0.000000e+00	2	0.000000e+00	0.000000e+00	3
1	4.084624e-30	9.302652e-44	1	4.554366e-30	7.065005e-44	2	3.155444e-30	2.829518e-36	3
2	7.534802e-11	1.716036e-24	1	8.401322e-11	1.303263e-24	2	3.047917e-10	2.733098e-16	3
3	2.260441e-10	1.203249e-23	1	2.520397e-10	9.153474e-24	2	9.143752e-10	1.373579e-15	3
4	3.767401e-10	4.306237e-23	1	4.200661e-10	3.282540e-23	2	1.523959e-09	3.594286e-15	3
5	7.336635e-10	2.937494e-22	1	7.403554e-10	1.655999e-22	2	2.596219e-09	1.029755e-14	3
6	1.526817e-09	2.657501e-21	1	1.283971e-09	8.540594e-22	2	4.074879e-09	2.555219e-14	3
7	2.515532e-09	1.170273e-20	1	1.941394e-09	2.947009e-21	2	5.553538e-09	4.795359e-14	3
8	3.735206e-09	3.841891e-20	1	2.598816e-09	7.096927e-21	2	7.333096e-09	8.460289e-14	3
9	4.954880e-09	9.025451e-20	1	3.480985e-09	1.733885e-20	2	9.112654e-09	1.319863e-13	3
10	6.543697e-09	2.114118e-19	1	4.363154e-09	3.467370e-20	2	1.126008e-08	2.035961e-13	3

Tableau IV.2 – Affichage quelques lignes et colonnes des données

a. Description des données

On affiche la description des données pour chaque échantillon (**Sample**), pour faire connaître les caractéristiques des données.

En total il y a **1048575** entrées dans chaque paramètre (temps 01, déplacement 01 et classe 01) dans tous les **18 échantillons**.

	Temps 01	Déplacement 01	Classe 01	
count	1.048575e+06	1.048575e+06	1048575.0	RangeIndex: 1048575 entries, 0 to 1048574
mean	4.926114e+00	6.587672e-07	1.0	Data columns (total 3 columns):
std	2.973704e+00	4.139896e-08	0.0	# Column Non-Null Count Dtype
min	0.000000e+00	-2.631273e-08	1.0	0 Temps 01 1048575 non-null float64
25%	2.342915e+00	6.585144e-07	1.0	1 Déplacement 01 1048575 non-null float64
50%	4.922891e+00	6.585286e-07	1.0	2 Classe 01 1048575 non-null int64
75%	7.502868e+00	6.585428e-07	1.0	dtypes: float64(2), int64(1)
max	1.008284e+01	1.361503e-06	1.0	memory usage: 24.0 MB
				None

Figure IV.15 – Description des échantillons – exemple du premier échantillon.

b. Représentations des données (vibrations ou déplacements)

Le **boxplot** attribue des informations, qui sont suivantes : la forme (**Shape**), la variabilité et le centre (ou la médiane) d'un ensemble de données statistiques.

Il peut en conséquence vous renseigner sur les **Outliers**. Il peut également vous dire si les données sont symétriques, à quel point vos données sont regroupées et si et comment les données sont asymétriques.

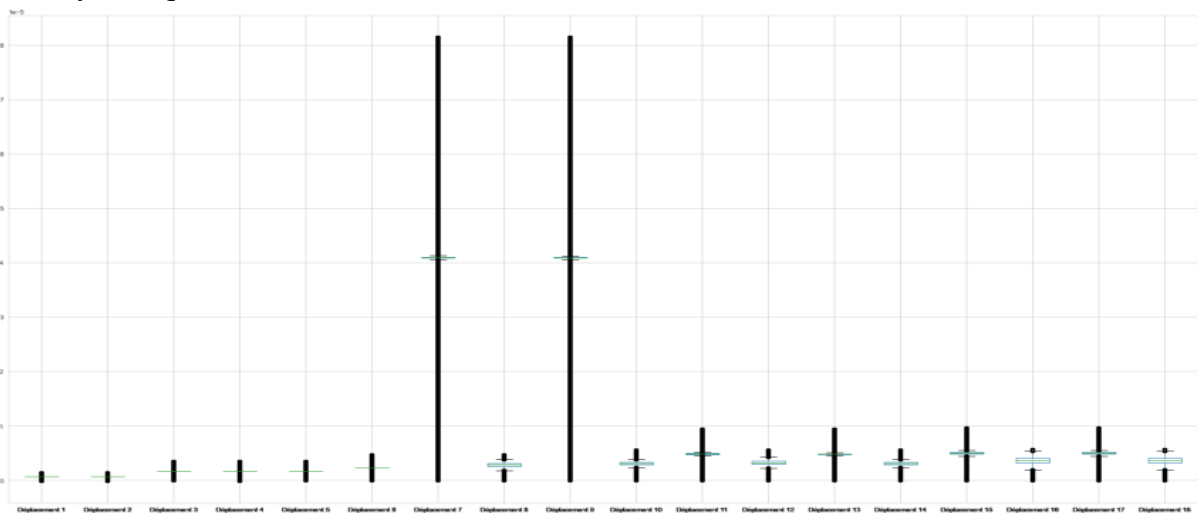


Figure IV.16 – Le **boxplot** des tous les vibrations de la butée **BFS-8033**

On cite les remarques suivantes :

- Il n'y a pas des valeurs aberrantes (**Outliers**), sera dû à l'origine des données, qui sont obtenues par la simulation Simulink et non pas des données réelles sur les chantiers ou les ateliers, donc c'est très compatible avec nos modèles.

- **Le taux de variation** change d'une classe à une autre, il est maximal aux classes 7 et 9, environ dix fois plus grand que les autres classes ; ces deux classes représentent le cas d'une défaillance

du l'anneau et rouleau de la butée. On voit ça au début des enregistrements qui est d'ordre de $8.10^{-5}m$ d'amplitude des vibrations ; Il est minimal pour les classes 1 et 2, qui sont les cas optimaux (idéals) : Equipement non défaillant, confirmé par les opérations de la maintenance préventives. L'amplitude des vibrations est à l'ordre de $1,35. 10^{-6}. m$

Le défaut dans l'anneau s'aggrave et devient plus en plus grand en cas de la continuité de fonctionnement de la butée après l'apparition initiale de ce défaut. En cas de continuité d'utilisation de la butée le défaut devient très grand et peut être la rupture de l'anneau (ou rouleau).

Le taux de variation des vibrations est représenté au début de la vibration au régime transitoire, dans ce régime le frottement et l'amortissement sont maximales.

Les vibrations sont forcément symétriques, parce que ce sont des vibrations harmoniques et fréquentielles. La fréquence de la vitesse de rotation de notre butée est $f_0 = 4,333$ HZ pour 260 tours par minute, tant disque pour 500 tours par minutes elle est $f_0 = 8,333$ HZ.

c. Standardisation des données (Data Scaling)

Les données soit les entrées ou les sorties sont variées aux différents taux de variations. Tant que les modèles de AI nécessitent une variation commune des paramètres, la standardisation donc est indispensable.

Il y a une corrélation de **0.95%** avant la standardisation, Tant qui après la standardisation, il y a une corrélation de **42%** entre les vibrations et les classes, en autre mot entre les vibrations de la butée et l'état de celle correspondant.

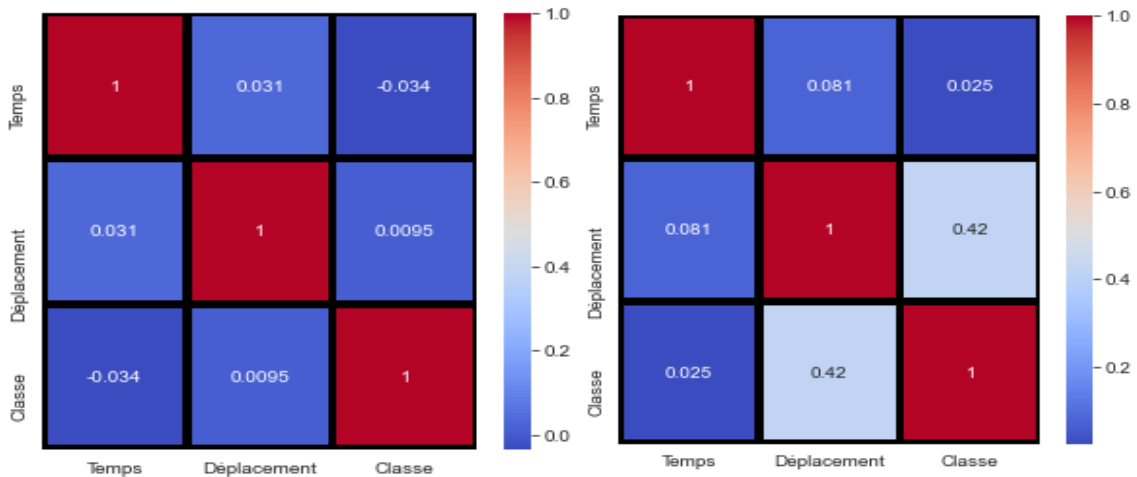


Figure IV.17 – **Heat-mab** corrélation des paramètres avant (gauche) et après (droite) la standardisation.

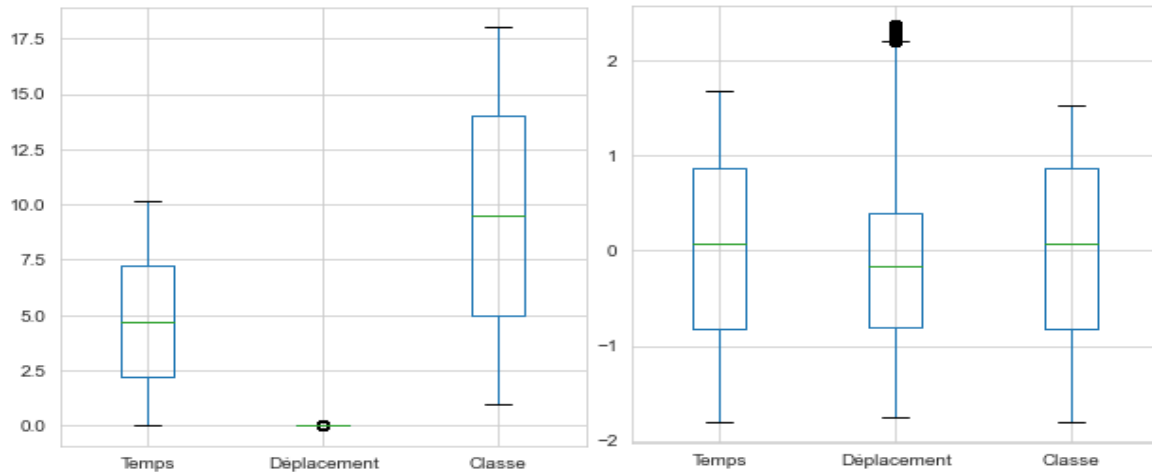


Figure IV.18 – **boxplot** des paramètres avant (gauche) et après (droite) la standardisation

d. Réduction des données

La puissance de calcul est limitée par la puissance des ordinateurs, d'autre part les vibrations au régime permanent représentent quelques similarités ; Pour ces deux raisons on réduit le volume des données. On prend 2 seconds de la simulation au lieu de 10 secondes ; Cette période est suffisante pour avoir des résultats acceptables.

Les modèles classifient les 18 cas selon les caractéristiques de chaque classe, mais ils ne sont pas capables de faire une bonne séparation et différenciation entre les classes qui présentent quelques similarités et donc la chute de la précision des modèles.

Par conséquent on a besoin d'une diversité de data pour que l'algorithme ne confonde pas entre les différents cas mais en même temps il faut introduire tous les defaults possibles afin de ne pas fausser les résultats. Cela et aussi n'est pas recommandé à cause des limites de notre puissance de calcul et aussi par l'augmentation de la confondation entre les données. Ce qui mène à une mauvaise **accuracy** des modèles, et suite à réduire nos problème de 18 classes en 3 classes seulement.

Pour couvrir toute la marge de nos données on va choisir les extrémités et un seul cas au milieu tout en prenant compte d'introduire tous les cas ; le premier cas est idéal (butée lubrifiée sans défauts) pour une vitesse de référence de 260 tours/ min, car c'est notre seul cas lubrifié et sans défaut ; pour le cas critique ou extrême on choisit le cas où il y a 3 defaults sous une vitesse de rotation de 500 tours/min car il englobe tous les defaults possible et donc si un seul cas survient notre modèle le percevra ; le cas milieu est le cas non lubrifié et sans défaut pour une vitesse de 500 tours/min. Pour introduire la notion d'absence du lubrifiant et aussi car ce cas représente un cas transitoire réel puisque une butée non lubrifiée va éventuellement subir un défaut. Aucun de ces 3 cas ne se ressemble est assuré la diversité de données et donc c'est le choix optimale vue les conditions imposées.

On choisit **trois classes** qui définies les cas qu'englobent d'état de la butée **BFS-8033** :

- 1. Equipement à bon état** : toutes les opérations de la maintenance préventives sont vérifiées.
- 2. Equipement à un mauvais état (absence de lubrification)** : la Maintenance préventive n'est pas respectée.
- 3. Equipement à un état catastrophique** : défaut dans la cage l'anneau et le rouleau, avec la vitesse limite.

La visualisation des trois classes par la fonction **subplots** de la bibliothèque **matplotlib**, qui permet de créer plusieurs dispositions de sous-points. Elle permet de comparer plusieurs graphes placés côte à côte.

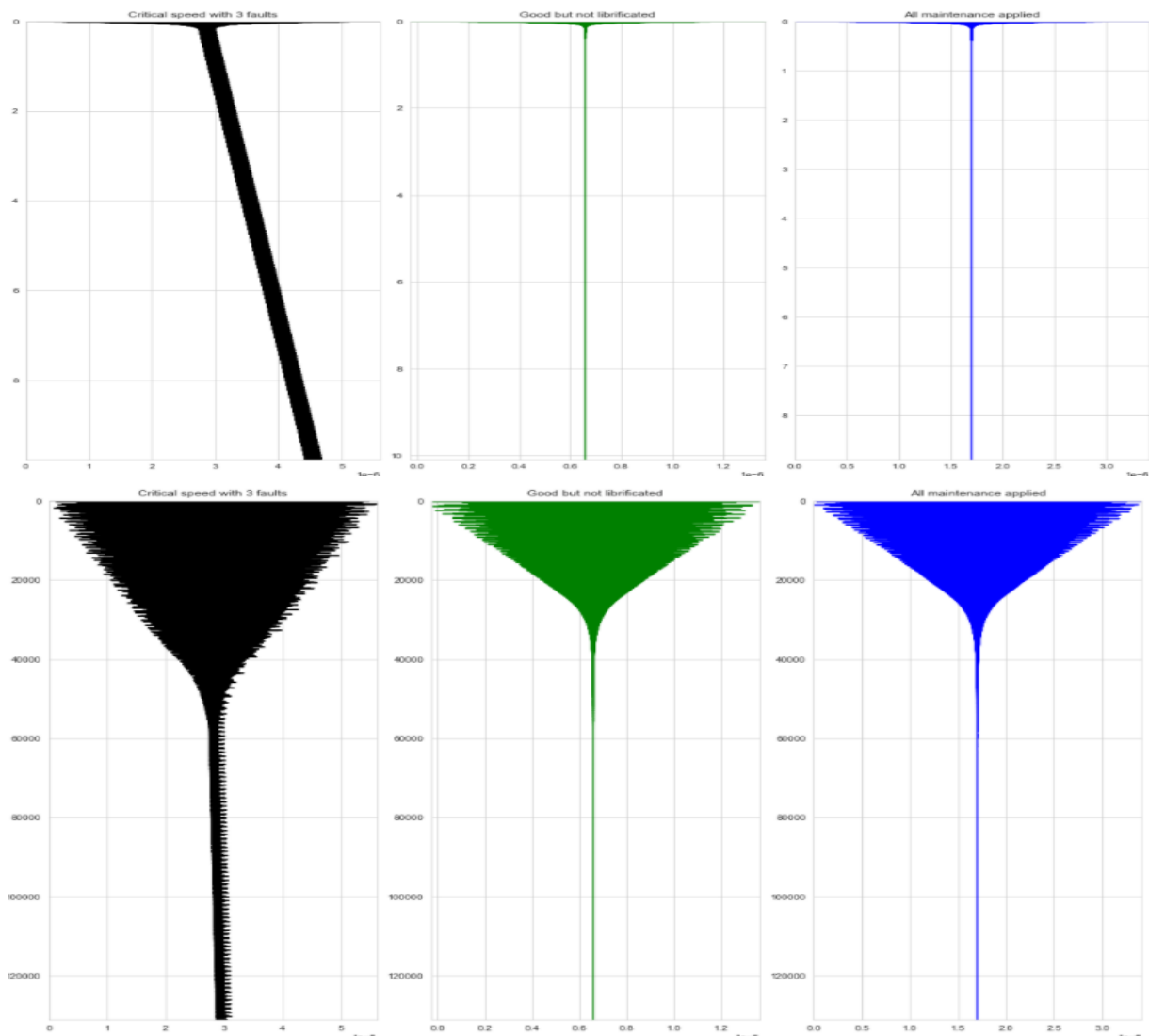


Figure IV.19 – Le **subplots** du trois cas différents après la standardisation des données.

On remarque qui :

Les trois graphes sont différents, le **bleue** représente le cas optimale ou idéal qui caractérisé par des petites vibrations, et un régime permanent stable ; au contraire du graphe **noir** qui représente le cas de présence de trois défauts, qui caractérise par des très grandes vibrations, et un régime permanente instable (augmentation). Tant que le **vert** représente une butée à un état moyenne (butée non lubrifiée).

IV.3.2. La Construction des modèles d'intelligence artificielle (AI)

Il y a des dizaines des algorithmes de **ML** : **Machine Learning**, et plusieurs architectures des réseaux des neurones artificiels **ANN**, chaque est modèle caractérisé par ses paramètres, et donne une précision (**Accuracy**) qui nous s'intéresse.

La performance d'un modèle est évaluée par la valeur d'**Accuracy** (précision), qu'il s'agit simplement d'un rapport entre les prédictions correctes et le nombre total des prédictions. Ainsi que l'évolution de la fonction de coût (**Loss Function**) des modèles.

IV.3.2.1. Le réseau des neurones : Multi Layer Perceptron (MLP)

A cause de sa performance optimisée le perceptron multi couches **MLP** est un réseau des neurones destinés à plusieurs applications, tel que la classification des données.

Avec ce problème de classification, on construit deux modèles neuronaux différents. Ces modèles se composent d'une couche d'entrée de deux neurones ou deux entrées : Temps et Déplacement (vibration). Une couche de sortie d'un seul neurone, qui prédite la classe. Des couches cachées, avec **ReLU** comme une fonction d'activation.

Les paramètres de ces architectures **MLP** se résumée aux tableaux suivants :

Layer (type)	Output Shape	Param #	Layer (type)	Output Shape	Param #
dense_10 (Dense)	(None, 200)	600	dense_43 (Dense)	(None, 200)	600
dense_11 (Dense)	(None, 200)	40200	dense_44 (Dense)	(None, 100)	20100
dense_12 (Dense)	(None, 200)	40200	dense_45 (Dense)	(None, 100)	10100
dense_13 (Dense)	(None, 200)	40200	dense_46 (Dense)	(None, 1)	101
dense_14 (Dense)	(None, 1)	201			
Total params: 121,401			Total params: 30,901		
Trainable params: 121,401			Trainable params: 30,901		
Non-trainable params: 0			Non-trainable params: 0		

Tableau IV.3 – Les deux architectures utilisées du modèle neuronale MLP

CHAPITRE IV Surveillance automatique d'état de la butée BFS-8033 par l'IA

Avec la descente de gradient stochastique **SGD** qu'est basée sur l'algorithme de rétro-propagation de l'erreur comme technique d'optimisation. Ainsi, et le **categorical crossentropy** comme fonction de coût.

Après la séparation des données à deux parties : **80%** des données pour l'entraînement de réseau, et **20%** pour le test. La phase de validation a pour but de tester le modèle en calculant : les prédictions correctes, incorrectes et les mauvaises prédictions **20%** des données de test.

Après l'entraînement de nos modèles en arrive aux résultats suivants :

Au premier architecture : **accuracy = 0.3362 = 33,62%** , **loss = 2.3981.10⁻⁷**

Au deuxième architecture : **accuracy = 0.3371 = 33,71%** , **loss = 2.3981.10⁻⁷**

La précision est presque la même $\approx 33,7\%$, malgré la grande différence entre les deux architectures. Cette précision est très faible et donc le modèle neuronale MLP est limité dans ce problème.

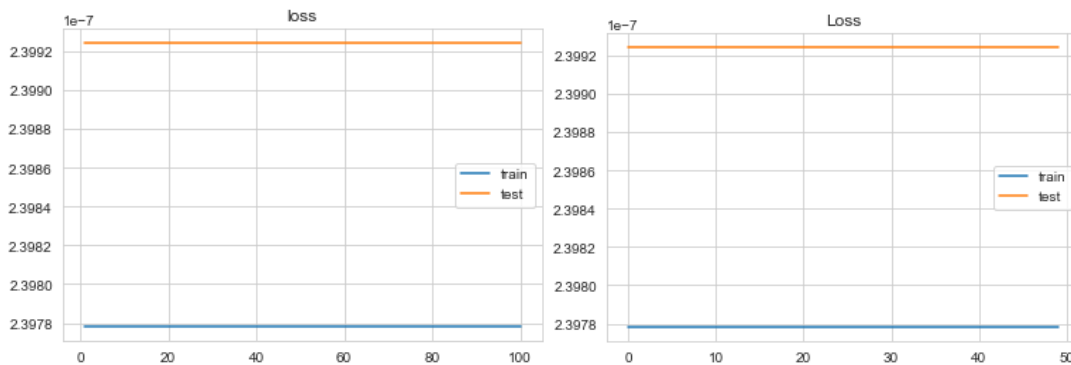


Figure IV.20 – La fonction de coût par époques au training et test

La fonction de coût au deux architectures soit au test ou à la validation est constant : **loss = 2.3981.10⁻⁷**, n'évolue pas, ça signifie que la capacité du modèle est plus puissante à la charge de classification.

On essaye les autres architectures de **MLP**, avec modification de :

- nombre des neurones à chaque couche cachée (100, 150, 200, 300, ...)
- Ajouter des autres couches cachées (2, 3, 4, 5, ...)
- Modifiée les valeurs des **époques** et le **batch size**, ainsi que les autres paramètres.

Afin d'atteindre une précision satisfaisante, Mais les résultats obtenus sont similaires aux deux premières architectures, environ **33%**, et parfois moindre de cette valeur.

La cause principale d'avoir une mauvaise précision est le nombre des caractéristiques (**Features**) d'entrée (**inputs**), qu'est 02 dans notre problème : Temps et Déplacement, Tant que la bonne performance du **MLP** nécessite des plusieurs caractéristiques d'entrées (**inputs**).

IV.3.2.2 Les algorithmes de Machine Learning

Pour avoir une précision mieux qui de **MLP**, on construit des modèles de **ML** avec ces données de simulation standardisées. Ces modèles possèdent des différentes configurations.

La précision des algorithmes (modèles) de **ML** pour la diagnostique automatique d'état de la butée **BFS-8033** est résumée au graphe suivant :

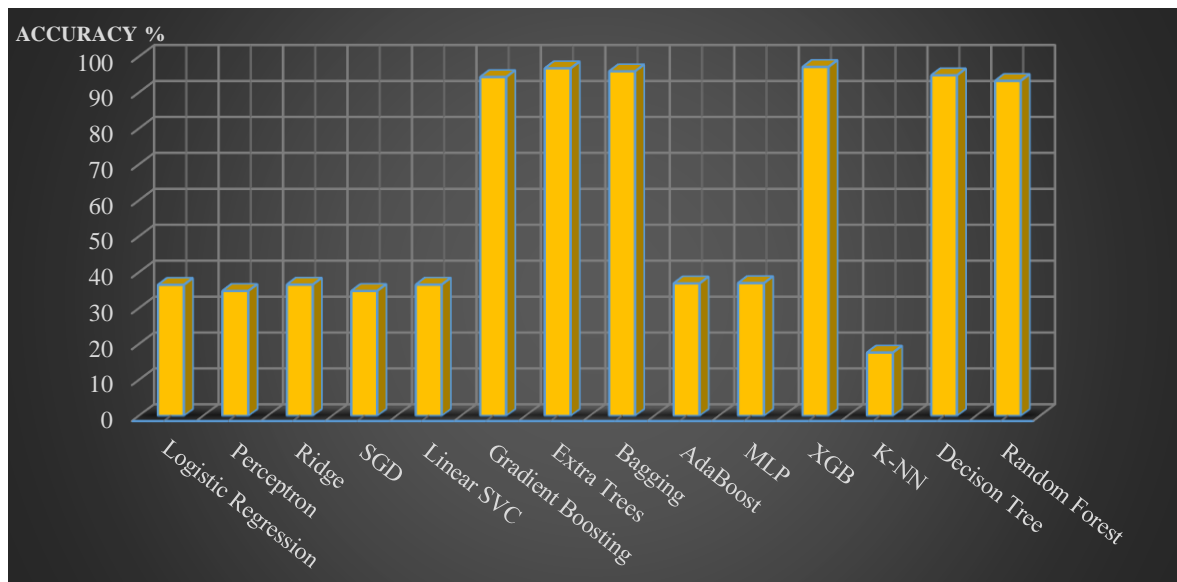


Figure IV.21 - La précision de diagnostic des algorithmes de ML

On remarque qu'il y a six (**06**) algorithmes qui possèdent des précisions satisfaites (**plus de 90%**), on choisisse deux (**02**) algorithmes pour l'appliquer à notre problème.

a. Random Forest Classificateur (RF)

Le **RF** est un algorithme de **ML** pour les problèmes de classification. Après la préparation des données d'entrées, et entraînée ce modèle. Après l'entraînement du modèle **RF**, on a obtenu une bonne précision de **93.09%**.

Le Tableau IV.4 représente : **la précision, recall, F1-Score** et **support** qui sont des indicateurs supplémentaires de la performance de ce modèle, ils sont des valeurs proches à **1** qui indique la bonne performance de **RF** à la classification, et donc au bon diagnostic de l'état de la butée.

	precision	recall	f1-score	support
1	0,83	1,00	0,91	4967
2	1,00	0,89	0,94	4513
3	1,00	0,90	0,95	5069

Tableau IV.4 – Indicateurs supplémentaires sur la performance du modèle RF

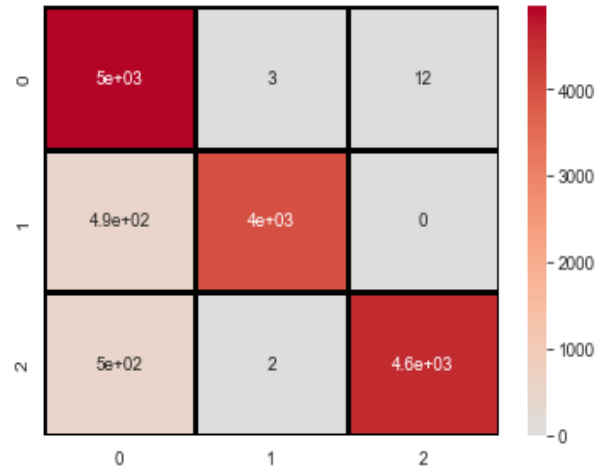
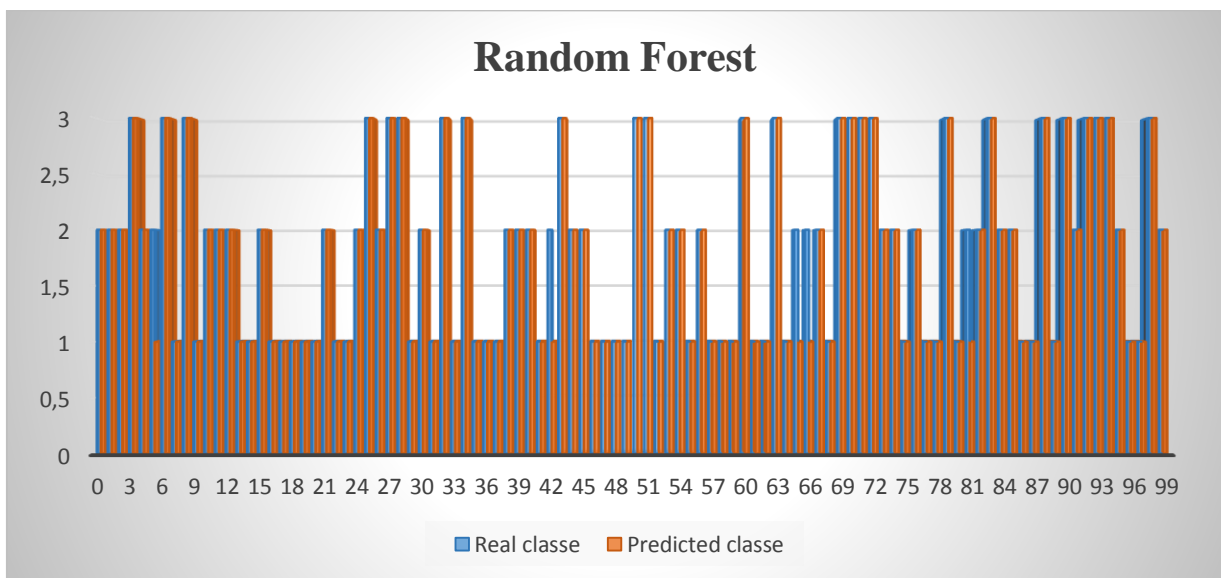


Figure IV.22 – La matrice de confusion de modèle RF

La matrice de confusion Figure IV.22 montre les résultantes des prédictions du modèle sur l'ensemble de test dont l'axe y montre les classes réelles, et l'axe x montre les prédictions. On remarque qu'il y a une petite confusion à la matrice de confusion (**Confusion matrix**), lorsque la prédiction du première classe (la classe numéro 0) par rapport au premier et la deuxième classe (la classe numéro 1 et 2), cela dû à la similarité des quelques parties des vibrations, et aussi dû à la réduction du volume des données. Les deux classes restées sont bien prédites par le modèle **RF**, et donc prennent des petites valeurs (**3**, **12**, **0** et **2**). La diagonale représente les valeurs prédites correctement par rapport aux valeurs réelles sur les données de test, qui sont des grandes valeurs et donc une bonne précision du modèle.



IV.23 - Comparaison entre les valeurs réelles et prédites par le RF

b. XGBoost Classificateur (XGB)

Le **XGB** est un algorithme de **ML** pour les problèmes de classification. Il est basé sur un arbre de décision qui utilise un processus appelé **boosting** pour améliorer les performances.

Après la préparation des données d'entrées, et entraînée ce modèle, On a obtenu une précision optimale de **97.17%**.

Le Tableau IV.5 représente : **precision, recall, F1-Score** et **support** qui sont des indicateurs supplémentaires de la performance de ce modèle, ils sont des valeurs proches à **1** qui indique la bonne performance de **XGB** à la classification, et donc à la diagnostique de l'état de la butée.

	precision	recall	f1-score	support
1	0,83	1,00	0,91	4967
2	1,00	0,89	0,94	4513
3	1,00	0,90	0,95	5069

Tableau IV.5 – Indicateurs supplémentaires sur de modèle XGB

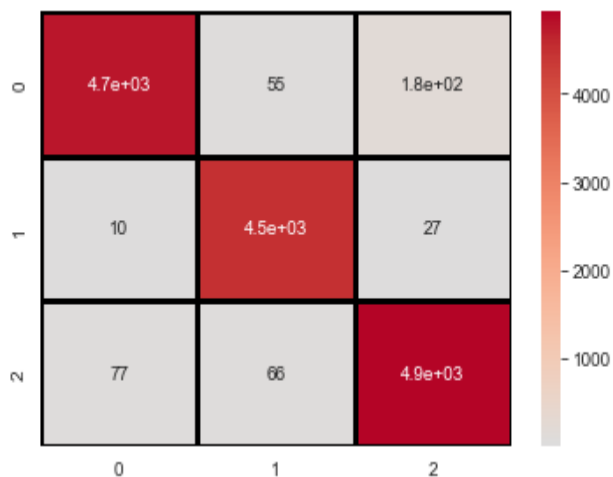
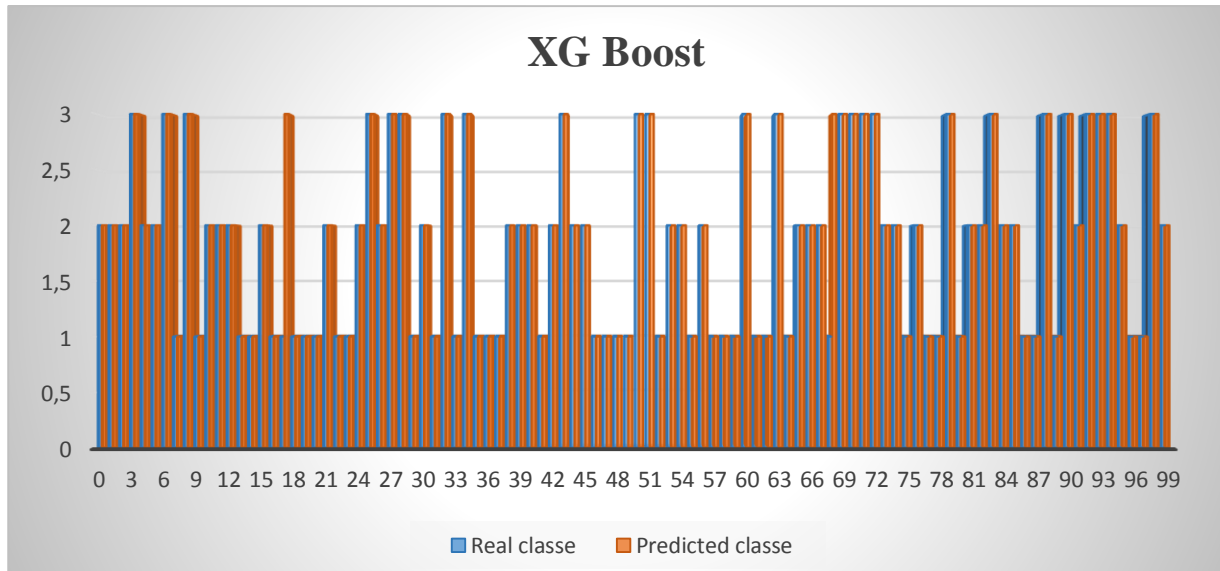


Figure IV.24 – La matrice de confusion la performance du modèle XGB

La matrice de confusion de **XGB** (Figure IV.24) a des quelques améliorations par rapport à celle de **RF**, tandis qu'il y a une petite confusion à la prédiction d'une seule classe : la première classe (la classe numéro 0) par rapport à la troisième classe (la classe numéro 2), cela dû à la similarité des quelques parties des vibrations, et aussi dû à la réduction du volume des données.

La diagonale représente les valeurs prédites correctement par rapport aux valeurs réelles sur les données de test, qui sont des grandes valeurs et donc une bonne précision (la précision optimale).



IV.25 - Comparaison entre les valeurs réelles et prédites par le XG Boost

IV.4. Implémentation du modèle d'IA dans le système de surveillance de TD

Afin d'améliorer la maintenance préventives traditionnelle, et donc diminuer le coût de défaillance très élevé. La surveillance automatique d'état des matériels sensibles et coûteuse sera indispensable.

Les modèles d'intelligence artificielle peuvent remplacer la surveillance humaine par un système de surveillance automatique. Ce système a besoin des données sur le matériau, ces données sont collectées à partir des capteurs dans le Top Drives, comme les capteurs de : température, niveau d'huile et aussi de vibration. Les données de ces capteurs seront les entrées du modèle de **ML** ou de **DL**. Ce modèle fait le traitement de ces données, et prédit l'état du matériel (butée), et on peut mener ce modèle par un système d'alerte dans la cabine de chef de poste ou dans un endroit visible par les opérateurs, afin qui soit : continuer les opérations ; corrigée le (ou les) défaut (s), ou soit d'arrêter le Top Drive aux états critiques de la butée.

Conclusion

Il semble que les modèles d'intelligence artificielle sont des outils puissants et donnent de bons résultats dans la prédiction de l'état de la butée **BFS-8033**, malgré la mauvaise précision du réseau des neurones (**MLP**), les modèles de **Machine Learning** atteignent des résultats très optimisés : le **Random Forest** a une précision de **93.09%**, le **XGBoost** assure **97.17%** de certitude, ce qui nous a motivé à l'adopter pour répondre à la problématique posée.

Ces modèles peuvent être implémentés dans un système de surveillance automatique, qui fait détecter les défauts et protéger les parties sensibles et coûteuses du Top Drive.

Conclusion générale

L'industrie pétrolière est un domaine critique et compétitif, dont le coût d'arrêt (défaillance) souvent élevé issue des mauvaises décisions de maintenance, qui peuvent affecter même la maintenabilité, la sécurité et l'environnement.

La maintenance permet non seulement de limiter les pannes mais surtout de prévenir les éventuelles défaillances, et cela est une grande aide pour gagner du temps, et améliorer la productivité, la rentabilité de forage. La stratégie de maintenance doit être toujours optimisée pour faire correctement sa mission. Dans ce mémoire, une approche de surveillance aidée par l'intelligence artificielle était proposée, dont les données provenaient d'une simulation sous **Matlab**, afin de répondre à une problématique réelle rencontrée dans les chantiers de forage est la défaillance de la butée du Top Drive.

Par la suite, les algorithmes de l'intelligence artificielle utilisant les données obtenues des simulations, pour la prédiction de l'état de la butée du Top Drive ont fourni des résultats satisfaisants assurant le contrôle automatique de l'état de santé de la butée avec une précision de **97%**, afin d'éviter les erreurs dues au contrôle humain.

Il a été proposé d'adopter ce système dans les plateformes pétrolières, où les données de surveillance sont facilement disponibles à partir des capteurs et de l'historique et prêtes à être exploitées et utilisées.

Bibliographies

- [1] Tout savoir sur le pétrole.URL :<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-fossiles/tout-savoir-petrole>
- [2] A. Slimani M. Daddou, FORMATION JDF module M1 & M2, sonatrach ,2004
- [3] Negadi.A, La maintenance des équipements de forage, Univ-tlemcen, 2014
- [4] Jean C. Mimol, Formation Assistant Driller ENAFOR
- [5] Forage, URL: <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/forage>
- [6] Bouselsal Boualem, Forage d'eau procédés et mesures URL : https://www.researchgate.net/publication/333172998_FORAGE_D'EAU_Procedes_et_mesures/download
- [7] Industrie pétrolière - Définition et Explications.URL :<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Industrie-petroliere-page-3.html>
- [8] Jaen-Paul, NGUYEN, Le forage, Editions technip, 1993
- [9] A.Slimani ,M.Dadou, Foramtion JDF ,Sonatrach Devision forage département formation, Mars 2004
- [10] CHERRFI.M, Etude et maintenance de treuil de forage, Univ-Chlef, 2012
- [11] LAASSISSE, Modélisation du refroidissement des équipements de fond dans les puits lors de forage, Univ-Ouargla, 2013
- [12] Top Drives, <https://www.bentec.com/equipment/mechanical-drilling-rig-equipment/top-drives.html>
- [13] Annular BOP.URL: <https://www.intlefoil.com/product-category/wellhead-bop-manifold/bop/annular-bop/>
- [14] Technical manual BENTEC
- [15] GDM Top Drives/Global Drilling Support, GDS-GDM-Top-Drive-Systems.pdf URL: <http://www.globaldrillingsupport.com/wp-content/uploads/2015/08/GDS-GDM-Top-Drive-Systems.pdf>
- [16] Tesco 250 EMI 400 Top Drive - PDFCOFFEE.COM, pdfcoffee.com_tesco-250-emi-400-top-drive-pdf-free.URL: <https://pdfcoffee.com/qdownload/tesco-250-emi-400-top-drive-pdf-free.html>
- [17] Tesco® 500 ESI 1000 Top Drive | Nabors. URL: <https://www.nabors.com/equipment/automated-surface-equipment/top-drives/electric-top-drives/tesco-500-esi-1000-top-drive>

- [18] Nov, top-drive-technologies-brochure.pdf.URL:<https://www.nov.com/-/media/nov/files/products/rig/rig-equipment/top-drive-systems/top-drive-technologies-brochure.pdf>
- [19] Top drives - Bentec GmbH Drilling & Oilfield Systems. URL:
https://www.bentec.com/pdf_files/topdrive-flyer_491_1.pdf
- [20] BOUHANNACHE Zoubir, Top drive guide pratique de maintetance, 2009.
- [21] TOP DRIVE MECHANICAL SYSTEMS COURSE MANUAL.
- Drilling ip forward <https://www.freepatentsonline.com/y2019/0203546.html>
- [22] BABOURI MOHAMMED et BARANI ZOUBIR, DESCRIPTION ET ENTRETIEN D'UNE TOP DRIVE partie hydraulique, année 2005/2006.
- [23] LWCV ACTUATOR ASSEMBLY AND MAINTENANCE INSTRUCTIONS.
- [24] CANRIG TOP DRIVE DRILLING SYSTEM SECTION 6: PARTS.
- [25] ENTP : TYPE DE MAINTENANCE PREVENTIVE SYSTEMATIQUE.
- [26] Top Drive systems-Nabors Industries.URL:
<https://www.nabors.com/sites/default/files/resources/Top-Drives-Canrig.pdf>
- [27] BULLETIN DE SENSIBILISATION N002 DMEP 10.
- [28] SKF- BFS-8033 Butées à rouleaux coniques_20210620. URL:
<https://www.skf.com/africa/fr/products/rolling-bearings/roller-bearings/tapered-roller-thrust-bearings/productid-BFS-8033>
- [29] A Numerical Model to Predict Damaged Bearing Vibrations.URL:
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1077546307080040?journalCode=jvcb>
- [30] Rolling element bearing components and failing frequencies.URL:<https://power-mi.com/content/rolling-element-bearing-components-and-failing-frequencies>
- [31] 5-DOF Dynamic Modeling of Rolling Bearing with Local Defect considering Comprehensive Stiffness under Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication.
URL:<https://www.hindawi.com/journals/sv/2020/9310278/>
- [32] A Vibration Model of Ball Bearings with a Localized Defect Based on the Hertzian Contact Stress Distribution.URL: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2018/5424875/>
- [33] Normal Line Contact of finite length cylinders.
URL:<http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUMechEng/article/view/2682/1650>

- [34] A critical overview of internal and external cylinder contact force models.
URL:<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00624469>
- [35] Guebla, Equipement de forage, Univ-Boumerdes-FHC.
- [36] Cours : Analyses vibratoires. URL :
<https://www.youtube.com/watch?v=K2HPu6kMXGw>
- [37] API Certified Oilfield & Drilling Rig Equipment Workshop Services.
URL:<https://zafco.net/>
- [38] Tapered Roller Thrust Bearing.URL:
<https://www.motionindustries.com/products/sku/00662804>
- [39] Stainless Steel 440 (UNS S44000)
- [40] Claude Touzet, LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS, INTRODUCTION AU CONNEXIONNISME, Collection de l'EERIE, 1992.URL : <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01338010>.
- [41] Mohammed Msaaf, Fouad Belmajdoub, L'application des réseaux de neurone de type " feedforward " dans le diagnostic statique. Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, Dec 2015, Tanger, Maroc. hal-01260830.URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01260830>
- [42] GANA Massine, "Implémentation d'un réseau de neurones dans un microcontrôleur", Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté de Génie Electrique et de l'informatique, 2016.
- [43]Introduction to random forest.URL: <https://www.section.io/engineering-education/introduction-to-random-forest-in-machine-learning/>
- [44] Hicham CHAOUI, "Conception et comparaison de lois de commande adaptative à base de réseaux de neurones pour une articulation flexible avec non-linéarité dure ", université du Québec à Trois-Rivières, Décembre 2002.
- [45] B.B.Misra and S.Dehuri , "FLANN for classification task in data mining ",Journal of computer science,2007
- [46] Eñaut Muxika Olasagasti. Application des réseaux de neurones à l'identification d'un axe de machine-outil. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2002.Français.
- [47] SAMUEL BÉDARD-VENNE, Réseau de neurones artificiels et application à la classification d'images, Université du Québec à Montréal, Mai 2018.
- [48] Loss Functions.URL:<https://peltarion.com/knowledgecenter/documentation/modeling-view/build-an-ai-model/loss-functions/>

- [49] Random forest classifier.URL:
<https://scikitlearn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html>
- [50] Machine learning. URL : <https://machinelearningmastery.com>
- [51] AAZZAB, ABRIANE & BENZAOUAGH, Application des réseaux de neurones artificiels pour la classification, Maroccan JBS.
- [52] Coline Talon, Analyse de différents algorithmes de classification par apprentissage automatique, Congrès Lambda Mu 21, Reims, France, Oct 2018.
- [53] Apprentissage-supervise.URL : <https://analyticsinsights.io/5-apprentissage-supervise>
- [54] Youde Xiong, Y.Qian-Z.Xiong-D.Picard, Formulaire de mécanique Pièces de construction, Edition Eyerolles, 61 bld Saint-Germain, 75240 paris Cedex 05, Paris, 2007.
- [55] J.F.Debongnie, Conception et Calcul des éléments de machines, Liège, Belgium, 2011.