

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**La Maintenance basée sur la fiabilité d'un organe mécanique
(engrenage hélicoïdale en double)**

Cas : réducteur d'un turbo-alternateur

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET FIABILITE MECANIQUE

PRESENTE PAR : OTMANI MOSAAB

DIRECTEUR DU MEMOIRE : MR LAABACI .A M.A.A

MR KHELIF .R M.C.A

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : ME ZEMMOURI .Z M.C.A

EXAMINATEURS : ME ZEMMOURI .Z M.C.A

MR TADJINE .K M.C.A

MR OMRI .M/S M.A.A

Année: 2013/2014

Table des matières

Chapitre 1 : Description de l'entreprise	Erreur ! Signet non défini.
1.1. Historique de l'entreprise :	Erreur ! Signet non défini.
1.1.1. Présentation de l'entreprise FERTIAL (SPA) :	Erreur ! Signet non défini.
1.1.2. Les directions générales :	Erreur ! Signet non défini.
1.1.3. Présentation de complexe Annaba :	Erreur ! Signet non défini.
1.2. Les unités du complexe :	Erreur ! Signet non défini.
1.3. Présentation de la centrale utilité 2 :	Erreur ! Signet non défini.
1.3.1. Structure de la centrale :	Erreur ! Signet non défini.
1.3.1.a. L'unité pompage :	Erreur ! Signet non défini.
1.3.1.b. Section dessalement d'eau de mer :	Erreur ! Signet non défini.
1.3.1.c. Section eau déminéralisée:	Erreur ! Signet non défini.
1.3.2. Section chaudière :	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3. Section turbo-alternateur :	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3.a. La Turbine à vapeur :	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3.b. Réducteur à engrenage a chevron : « SIEMENS T80 »	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3.c. Alternateur :	Erreur ! Signet non défini.
1.3.4. Les compresseurs d'air :	Erreur ! Signet non défini.
1.3.4. a. Section des compresseurs :	Erreur ! Signet non défini.
1.3.4. b. Production :	Erreur ! Signet non défini.
1.4. Conclusion :	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les stratégies de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
2.1. Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
2.2. La fonction Maintenance : un processus stratégique	Erreur ! Signet non défini.
2.2.1. Qu'est-ce que la maintenance ?	Erreur ! Signet non défini.
2.2.2. Maintenance et performances	Erreur ! Signet non défini.
2.2.3. Les stratégies de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
2.2.4. Méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
2.2.4.a. MSG-3 : La méthode de l'industrie aéronautique	Erreur ! Signet non défini.
2.2.4. b. OMF : optimisation de la maintenance par la fiabilité	Erreur ! Signet non défini.
2.3. L'évaluation des stratégies de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
2.4. L'impact d'une politique de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
2.5. L'impact des conditions d'exploitation	Erreur ! Signet non défini.
2.6. La hiérarchisation des tâches de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
2.7. L'état des matériels	Erreur ! Signet non défini.
2.8. L'état de l'art de l'évaluation des stratégies de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
2.8.1. Les modèles élémentaires	Erreur ! Signet non défini.
2.8.1.a. Modèles basés sur l'âge	Erreur ! Signet non défini.
2.8.1.b. Modèles de remplacement par blocs	Erreur ! Signet non défini.
2.8.2. Les modèles de maintenance conditionnelle	Erreur ! Signet non défini.
2.8.2.a. Des politiques à limite de contrôle	Erreur ! Signet non défini.
2.8.2.b. La modélisation des dégradations	Erreur ! Signet non défini.
2.9. Conclusion :	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre 3 : Etat de l'art sur le groupe turbo-alternateur	Erreur ! Signet non défini.
3.1. Le groupe Turbo-alternateur	Erreur ! Signet non défini.

3.1.1. Généralité	Erreur ! Signet non défini.
3.2. La turbine à vapeur	Erreur ! Signet non défini.
3.2.1. Classification des turbines à vapeur	Erreur ! Signet non défini.
3.3. Alternateur :	Erreur ! Signet non défini.
3.4. Les réducteurs de vitesse	Erreur ! Signet non défini.
3.4.1. Définition	Erreur ! Signet non défini.
3.4.2. Fonction	Erreur ! Signet non défini.
3.4. Conclusion :	Erreur ! Signet non défini.
4. Chapitre 4 : Calcul du dimensionnement du réducteur	Erreur ! Signet non défini.
4.1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
4.2. L'état du réducteur	Erreur ! Signet non défini.
4.2.1. Description de tableau :	Erreur ! Signet non défini.
4.2.3. Application de la loi de WEIBULL	Erreur ! Signet non défini.
4.2.4. Test de KOLMOGOROV SMIRNOV :	Erreur ! Signet non défini.
4.2.5. Calcul de la moyenne des temps de bon fonctionnement :	Erreur ! Signet non défini.
4.2.6. La densité de probabilité :	Erreur ! Signet non défini.
4.2.7. La fonction de répartition :	Erreur ! Signet non défini.
4.2.8. La fonction de fiabilité	Erreur ! Signet non défini.
4.2.9. Le taux d'avarie :	Erreur ! Signet non défini.
4.2.10. Calcul de maintenabilit	Erreur ! Signet non défini.
4.2.11. La densité de probabilité de réparation	Erreur ! Signet non défini.
4.2.12. La fonction de répartition des temps de réparation:	Erreur ! Signet non défini.
4.2.13. Calcul de MTTR :	Erreur ! Signet non défini.
4.3. Transmission par engrenages	Erreur ! Signet non défini.
4.3.1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
4.3.2. Notions sur les engrenages.....	Erreur ! Signet non défini.
4.4. Engrenages hélicoïdaux.....	Erreur ! Signet non défini.
4.4.1. Engrenages hélicoïdaux à axes parallèles :	Erreur ! Signet non défini.
4.4.2. Grandeurs fondamentales :	Erreur ! Signet non défini.
4.4.2. a. Angle d'hélice et recouvrement	Erreur ! Signet non défini.
4.4.2. b. Pas de module	Erreur ! Signet non défini.
4.4.2. c. Dimension de roues, entraxe.....	Erreur ! Signet non défini.
4.4.2. d. Caractéristiques géométriques :	Erreur ! Signet non défini.
4.5. Engrènement.....	Erreur ! Signet non défini.
4.5.1. Rapport de transmission.....	Erreur ! Signet non défini.
4.5.1. a. Angle de pression apparent.....	Erreur ! Signet non défini.
4.5.1. b. Nombre de dent virtuel	Erreur ! Signet non défini.
4.5.1. c. Nombre de dents limite	Erreur ! Signet non défini.
4.6. Calcul de résistance.....	Erreur ! Signet non défini.
4.7. Vérification de la résistance	Erreur ! Signet non défini.
4.7.1. Vérification de la résistance de la racine de la dent	Erreur ! Signet non défini.
4.7.2. Vérification de la résistance des flancs.....	Erreur ! Signet non défini.
4.9. Résultats et discussion	Erreur ! Signet non défini.
4.9.1. Calcul d'une paire de roues cylindriques à denture hélicoïdale :	Erreur ! Signet non défini.
4.9.1.a. Géométrie de dent et matériau	Erreur ! Signet non défini.

4.9.1.b. Dureté de la surface	Erreur ! Signet non défini.
4.9.1.c. Lubrification	Erreur ! Signet non défini.
4.9.2. Facteurs d'influence généraux.....	Erreur ! Signet non défini.
4.9.3. Forces dans le cercle de fonctionnement:.....	Erreur ! Signet non défini.
4.9.4. Limite du pied	Erreur ! Signet non défini.
4.9.5 Contrainte de pied de dent admissible de la roue dentée d'essai	Erreur ! Signet non défini.
4.9.6. Sécurité des flancs	Erreur ! Signet non défini.
4.9.7. Résistance au grippage	Erreur ! Signet non défini.
4.9.8. Critère de la température éclair	Erreur ! Signet non défini.
4.9.10.Critère de température intégrale	Erreur ! Signet non défini.
4.9.11. Tolérance des dentures	Erreur ! Signet non défini.
4.9.12. Données complémentaires.....	Erreur ! Signet non défini.
4.10. Détermination de la forme de la dent :	Erreur ! Signet non défini.
4.10.1. Calcul du pignon	Erreur ! Signet non défini.
4.10.2. Calcul de la roue	Erreur ! Signet non défini.
5. Chapitre 5 Application de la méthode de MBF à un groupe turbo-alternateur.....	Erreur ! Signet non défini.
5.1 Etape 1 : découpage du procédé d'un bien :	Erreur ! Signet non défini.
5.1.1. Objectifs :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.1.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape :	Erreur ! Signet non défini.
5.1.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.1.4. Documents à produire à la fin de l'étape :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.2 Etap2 : sélection des systèmes :	Erreur ! Signet non défini.
5.2.1. Objectifs :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.2.2. Documents nécessaire pour la réalisation de l'étape.....	Erreur ! Signet non défini.
5.2.2. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.2.3. Documents à produire à la fin de l'étape.....	Erreur ! Signet non défini.
5.3 Etap3 : Identification des limites du système et sous-systèmes :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.3.1. Objectifs :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.3.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape	Erreur ! Signet non défini.
Les documents sont :	Erreur ! Signet non défini.
5.3.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape.....	Erreur ! Signet non défini.
5.3.4. Documents à produire à la fin de l'étape :	Erreur ! Signet non défini.
5.4 Etape 4 : Identification des défaillances fonctionnelles :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.4.1. Objectifs.....	Erreur ! Signet non défini.
5.4.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape:	Erreur ! Signet non défini.
5.4.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.4.4. Document à produire à la fin de l'étape :	Erreur ! Signet non défini.
5.5 Etape 5. Hiérarchisation de la criticité de défaillance :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.5.1Objectifs.....	Erreur ! Signet non défini.
5.5.2. Documents nécessaire pour la réalisation de l'étape :	Erreur ! Signet non défini.
5.5.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.5.4. Documents à produire à la fin de l'étape :	Erreur ! Signet non défini.
5.6 ETAPE 6 : Identification des matériels critiques et des causes	Erreur ! Signet non défini.
5.6.1. Objectif	Erreur ! Signet non défini.
5.6.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape :	Erreur ! Signet non défini.

5.6.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :	Erreur ! Signet non défini.
5.6.4. Document à produire à la fin l'étape	Erreur ! Signet non défini.
5.7 ETAPE 7. Sélections des tâches de maintenance et de leur périodicité	Erreur ! Signet non défini.
5.7.1. Objectifs.....	Erreur ! Signet non défini.
5.7.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape :	Erreur ! Signet non défini.
5.7.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape	Erreur ! Signet non défini.
5.7.4. Document à produire à la fin de l'étape	Erreur ! Signet non défini.
5.8 Etape 8. Rédaction des procédures de maintenance et implantation.....	Erreur ! Signet non défini.
5.8.1. Objectif :	Erreur ! Signet non défini.
5.8.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape	Erreur ! Signet non défini.
5.8.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.8.4. Documents à produire à la fin fr l'étape	Erreur ! Signet non défini.
5.9 . Etape 9 : Définition des indicateurs de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
5.9.1. Objectifs.....	Erreur ! Signet non défini.
5.9.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape	Erreur ! Signet non défini.
5.9.4. Documents à la fin de l'étape	Erreur ! Signet non défini.
5.10 Etape 10 : Evolution du programme de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
5.10.1. Objectifs :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.10.2. Documents nécessaire pour la réalisation de l'étape.....	Erreur ! Signet non défini.
5.10.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape	Erreur ! Signet non défini.
5.10.4. Documents à produire à la fin de l'étape	Erreur ! Signet non défini.
Application de la méthode de MBF à un groupe turbo-alternateur	Erreur ! Signet non défini.
5.11 Etape 1 : Le découpage du groupe turbo-alternateur :	Erreur ! Signet non défini.
5.1.1. Découpage du groupe turbo-alternateur.....	Erreur ! Signet non défini.
5.1.1. a. La Turbine à vapeur : « G400 ».....	Erreur ! Signet non défini.
5.1.1. b. Alternateur « 10mva » :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.1.1. c. Réducteur à engrenage à chevron : « SIEMENS T80 ».....	Erreur ! Signet non défini.
5.12 Etape 2 : Sélection des systèmes	Erreur ! Signet non défini.
5.12.1. Choix de l'équipement :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.13 Etape3 : Identification des limites du système et sous-systèmes :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.13.1. Partie 1 :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.13.2. Partie 2 :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.14 Etape4 : Identification des défaillances fonctionnelles	Erreur ! Signet non défini.
5.14.1. Pompe de graissage d'engrenage défectueux.....	Erreur ! Signet non défini.
5.14.2. Manchon d'accouplement endommagé.....	Erreur ! Signet non défini.
5.14.3. Choc accouplement-réducteur :	Erreur ! Signet non défini.
5.14.4. Défaillance au niveau du palier	Erreur ! Signet non défini.
5.14.5. Les défaillances liées aux engrenages :	Erreur ! Signet non défini.
5.14.6. Dégradation cumulée de tous les phénomènes	Erreur ! Signet non défini.
5.15 Etape 5. Hiérarchisation de la criticité de défaillance :.....	Erreur ! Signet non défini.
5.16 ETAPE 6 : Identification des matériels critiques et des causes	Erreur ! Signet non défini.
5.17. ETAPE 7 : Sélections des tâches de maintenance et de leur périodicité.....	Erreur ! Signet non défini.
5.18. Etape 8. Rédaction des procédures de maintenance et implantation.....	Erreur ! Signet non défini.
5.18.1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
5.18.2. Les étapes	Erreur ! Signet non défini.

5.18.2. a. Étape 1 : Identifier les procédures à créer ou à revoir	Erreur ! Signet non défini.
Les procédures imposées par la norme ISO 9001	Erreur ! Signet non défini.
Les questions à se poser	Erreur ! Signet non défini.
5.18.2.b. Étape 2 : Définir le contenu des procédures	Erreur ! Signet non défini.
5.18.2.c. Etape 3 : Définir la forme des procédures	Erreur ! Signet non défini.
5.19. Etape 9 : Définition des indicateurs de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
5.20. Etape 10 : Evolution du programme de maintenance	Erreur ! Signet non défini.
5.21. Conclusion	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion générale.....	95

Résumé

Les réducteurs occupent une place importante dans l'industrie et notamment à Ferial. Pour étudier le réducteur par une approche maintenance, nous avons commencé par une analyse bibliographique sur les turbo –alternateur. Ensuite, nous avons procédé à un calcul de fiabilité en exploitation. Les résultats montrent une fiabilité très en dessous de la moyenne. Ceci est causé par un ensemble de phénomènes de dégradation. Pour un bon choix des réducteurs dans le futur, nous nous sommes penchés sur la fiabilité en conception. Pour cela, un calcul de dimensionnement du réducteur a été fait. Ceci a permis de déceler les points névralgiques. La dernière partie du travail a été consacrée à l'application des 10 étapes de la maintenance basée sur la fiabilité (MBF) à notre système.

Remerciements

*Au terme de ce travail, mes vifs remerciements et ma profonde gratitude
s'adresse*

*À notre Dieu, le grand créateur qui m'a donné de la patience, du courage et de la
volonté afin d'atteindre ce travail.*

*Je tiens à remercier vivement mon promoteur « MR LAABACI .A » pour son
encadrement.*

*Monsieur KHELIF .R pour ces précieux conseils, son amabilité de superviser et
critiquer fructueusement le déroulement de cette étude, je lui exprime ici, ma vive
reconnaissance.*

*Messieurs, Mme, le président et les membres de jury, qui m'ont fait l'honneur
d'accepter de juger ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde
gratitude.*

*Mes remerciements les plus sincères vont aux enseignants du département de
mécanique et à tous les enseignants pour leurs conseils.*

*J'adresse également mes vifs remerciements à « Mr Maifi Tarek » pour son
soutien et ses efforts pour mener à bien la partie simulation.*

*Mes sincères remerciements s'adressent également à ma famille, mon père, ma
mère, mes frères ma fiancée et ma belle-famille qui n'ont pas hésité de m'aider et
m'encourager moralement et matériellement jusqu'à la fin de cursus de
formation.*

*Je souhaite adresser un message de tendresse à toutes les personnes qui m'ont
soutenu tout au long de la vie.*

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : L'état de défaillance de réducteur.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2 : Résultats de calcul des paramètres de la fiabilité.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3 : Calcul de la loi log normale	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 4 : Résultats de calcul de la fonction de répartition	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 5 : Caractéristiques géométriques	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 6 : Géométrie de dent et matériau.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 7 : Dureté de la surface.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 8 : Calcul de transmission.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 9 : Facteurs d'influence	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 10 : Forces dans le cercle de fonctionnement	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 11 : facteurs de profil de dent	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 12 : Contrainte de pied de dent	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 13 : Sécurité des flancs.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 14 : Résistance au grippage	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 15 : Critère de la température éclair	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 16 : Critère de température intégrale	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 17 : Tolérance des dentures	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 18 : Données complémentaires	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les unités du complexe.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2 : Turbo-alternateur (10 MVA)	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3 : La turbine	Erreur ! Signet non défini.
Figure 4 : Réducteur à engrenage en double « SIMENS T80 ».....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 5 : Alternateur	Erreur ! Signet non défini.
Figure 6 : Compresseur d'air	Erreur ! Signet non défini.
Figure 7 : L'évaluation des performances d'un programme de maintenance de type OMF	Erreur ! Signet non défini.
non défini.	
Figure 8 : Relation entre le profil d'exploitation et le comportement des matériels d'un système maintenu.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 9 : Group turbo-alternateur	Erreur ! Signet non défini.
Figure 10 : turbine à vapeur	Erreur ! Signet non défini.
Figure 11 : diagramme pression-vitesse pour un distributeur de turbin	Erreur ! Signet non défini.
Figure 12 : Le rotor et le stator d'un alternateur	Erreur ! Signet non défini.
Figure 13 : Transforme l'énergie mécanique en électricité Etape 1	Erreur ! Signet non défini.
Figure 14 : Transforme l'énergie mécanique en électricité Etape 2	Erreur ! Signet non défini.
Figure 15 : Transforme de l'énergie mécanique en électricité Etape3.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 16 : L'emplacement d'un réducteur	Erreur ! Signet non défini.
Figure 17 : Tracé de Weibull	Erreur ! Signet non défini.

Figure 18 : la densité de probabilité	Erreur ! Signet non défini.
Figure 19 : La fonction de répartition.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 20 : La fonction de fiabilité	Erreur ! Signet non défini.
Figure 21 : Taux de défaillance	Erreur ! Signet non défini.
Figure 22 : Densité de probabilité de réparation	Erreur ! Signet non défini.
Figure 23 : La fonction de répartition	Erreur ! Signet non défini.
Figure 24 : Différents types d'engrenages.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 25 : A denture droit, B, denture hélicoïdale	Erreur ! Signet non défini.
Figure 26 : Denture en double	Erreur ! Signet non défini.
Figure 27 : Denture en chevron	Erreur ! Signet non défini.
Figure 28 : Denture en spirale	Erreur ! Signet non défini.
Figure 29 : Denture hélicoïdale	Erreur ! Signet non défini.
Figure 30 : Recouvrement d'une cylindrique denture hélicoïdale	Erreur ! Signet non défini.
Figure 31 : Dimensions d'une roue cylindrique Denture hélicoïdale.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 32 : Roue fictive.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 33 : Nombre limite des dents pour roue a denture hélicoïdale	Erreur ! Signet non défini.
Figure 34 : Forces agissantes dans une roue cylindrique à denture hélicoïdale	Erreur ! Signet non défini.
défini.	
Figure 35 : Engrènement pignon /Roue	Erreur ! Signet non défini.
Figure 36 : Glissement spécifique pignon/Roue	Erreur ! Signet non défini.
Figure 37: Température de contact pignon/Roue	Erreur ! Signet non défini.
Figure 38 : Profondeur de trempe pignon/roue	Erreur ! Signet non défini.
Figure 39 : Rigidité de l'engrènement théorique pignon/roue	Erreur ! Signet non défini.
Figure 40 : Courbes de Woehler.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 41 : Courbes des coefficients de sécurité	Erreur ! Signet non défini.
Figure 42 : Viscosité de l'huile.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 43 : Système.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 44: Profil de dent pignon.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 45 : Groupe turbo-alternateur.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 46 : Turbo-alternateur 10 MVA.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 47 : Histogramme de la criticité.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 48 : Fonctionnement du système	Erreur ! Signet non défini.
Figure 49: Usure de palier.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 50: piqûres.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 51: Ecaillage	Erreur ! Signet non défini.
Figure 52 : Cassure au niveau de la dent	Erreur ! Signet non défini.
Figure 53 : Cumule de dégradation	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre 1 : Description de l'entreprise

1.1. Historique de l'entreprise :

A l'aube de l'indépendance, la situation du secteur de l'industrie des produits chimiques montrait une faiblesse notable dans les capacités de production installées qui se limitait à de petites unités de formation vétustes, utilisant des procédés archaïques ; c'est pourquoi le complexe « ASMIDAL » a mis en œuvre une stratégie de développement globale, connue à sa création en 1972 sous le nom du Complexe Phosphaté « SONATRACH ».

Cet ensemble industriel, qui est légal en importance de réalisation majeure du pays, a répondu dans les faits à la stratégie de développement ébauchée préalablement aux décisions en 1966 portant sur la nationalisation des ressources minières du pays et de leur valorisation.

L'année 1977 a été une année charnière dans la vie de l'entreprise « ASMIDAL » qui a vu sa restriction avec le délestage des activités secondaires et le recentrage sur son métier de base, à savoir la fabrication de l'ammoniac et des engrais.

La réalisation du complexe des engrais phosphates et azotés de Annaba rentre dans le cadre de la politique du développement de l'industrie chimique et principalement la promotion de l'agriculture algérienne qui représente un outil indispensable dans l'indépendance du pays.

1.1.1. Présentation de l'entreprise FERTIAL (SPA) :

FERTIAL est organisé sous la forme d'une société par action (SPA), 66% pour le groupe Espagnol Vilar mir, 34% pour ASMIDAL Algérie qui représente un capital social de 17.697.000.000.00 DA dont la durée de vie et de 99 ans. Elle est inscrite dans le registre de commerce sous le N°0363222B01 et sous le N° d'identification statistique 0001305053906 dont le siège social et située à plate-forme Annaba, route des salines BP 3088.

1.1.2. Les directions générales :

Il existe deux pôles industriels en Algérie :

- > La Plate-forme Annaba : complexe fabriquant des engrais phosphatés, azotés et de l'ammoniac avec des capacités installées de 1000 T/J d' NH_3 et 2000 T/J de nitrate d' NH_3 .
- > La Plate-forme Arzew (ALZOFERT) : complexe fabriquant des engrais azotés et de l'ammoniac avec des capacités installées de 2000 T/J d' NH_3 et 1500 T/J de nitrate d' NH_3 .

1.1.3. Présentation de complexe Annaba :

FERTIAL en tant que EPE /SPA, filiale du groupe ASMIDAL, a été créé le 01/03/2001.

Elle est dirigée par un Président Directeur Général (PDG), et emploie environ 831 travailleurs répartis comme suit :

- > Cadres supérieurs : 51
- > Cadres: 389
- > Maîtrise : 391

1.2. Les unités du complexe :

- Unité de centrale utilité 2
- Unité d'ammoniac
- Unité d'acide nitrique
- Unité nitrate d'ammonium
- Unité NPK

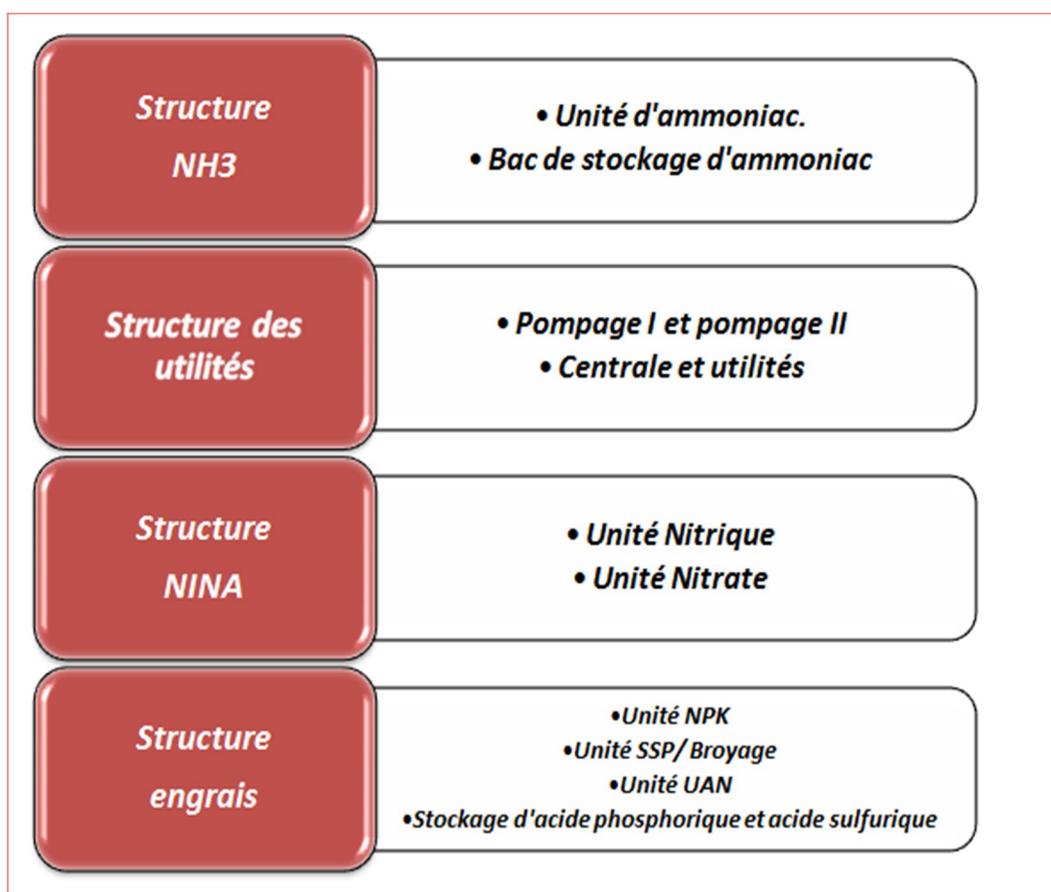


Figure 1 : Les unités du complexe

1.3. Présentation de la centrale utilité 2 :

La centrale est une unité importante dans le complexe FERTIAL.

Elle est pour but de satisfaire les besoins du complexe en matière utilités tel que : eau, vapeur, électricité.

1.3.1. Structure de la centrale :

Elle composée des sections suivantes :

1.3.1.a. L'unité pompage :

Elle a pour but d'assuré le besoin d'entreprise d'eau de mer nécessaire, cette unité est compose de 2 section, pompage 1 et pompage 2.

Chaque pompage est compose de :

- **Deux filtres rotatifs** : pour éliminer les matières en suspension telle que l'algue.
- **la chloration** : pour éliminer les matières micro organiques et les bactéries, on a deux types d'injection, injection continue et injection choc.
- **Deux pompes de remplissages** : pour remplit les conduits et chassé l'air.
- **Quatre pompes principales** : pour transporter l'eau de mer de la mer vers la cheminé d'équilibre.

1.3.1.b. Section dessalement d'eau de mer :

Elle a pour but de production d'eau dessalé nécessaire pour les autres structures et aussi pour la section d'eau déminée. Cette section est compose de :

- Trois blocs de dessalement multi flash A, B et C.
- un bloc de dessalement thermo-compression D.
- cinq bacs de stockages A, B, C, D et E.

1.3.1.b.1. Bloc de dessalement multi flash : a une capacité de production $170 \text{ m}^3/\text{h}$ pour chaque bloc c.-à-d. $510 \text{ m}^3/\text{h}$ pour les 3 blocs. Chaque bloc est composé de :

- **20 cellules identiques** : chaque cellule est composé d'un cuve et un séparateur un pot de recueillement et un condenseur.
- **un réchauffeur** : pour chauffer l'eau de mer.
- **5 éjecteurs** : un éjecteur de démarrage(GJ2109) et 4 éjecteurs de maintien(GJ2110), ils ont pour but de créer le vide dans le bloc pour facilite l'évaporation d'eau de mer dans des conditions anormal de température et de pression.
- **2condenseurs d'éjecteur(GE2111) et(GE2112)** : pour condensé les incondensables soutiré du bloc.

- **2 filtres d'eau de mer:** pour arrêter les matières en suspension trouve dans l'eau de mer avant l'entrée dans le bloc.
- **5 pompes :** une pompe de saumures (GP2107) et une pompe de recyclage(GP2103) et une pompe de distillats(GP2105) et une pompe d'injection d'anti tartre et anti mousse(GP2114) et une pompe de condensats(GP2108).
- **un bac d'anti tartre et anti mousse.**
- **un bac d'acide sulfurique (BS12).**

1.3.1.b.2. Bloc de dessalement thermo-compression : a une capacité production de 220 m³/h. Il est composé de :

- **4 cellules identiques :** chaque cellule est composée d'un séparateur et un couloir distillat et des un faisceau tubulaire vertical couloir saumure.
- **un condenseur distillateur :** a pour but de condensé la vapeur sortante de la 4^{ème} cellule.
- **un éjecto-compresseur :** pour aspiré la vapeur non condensé de la 4^{ème} cellule et aussi pour faire distribuer la vapeur entrante a la 1^{ère} cellule avec une méthode bien déterminer.
- **3 éjecteurs :** un éjecteur de démarrage(GJ2109) et 2 éjecteurs de maintien(GJ2110.3d) et(GJ2110.1d), ils ont pour but de créer le vide dans le bloc pour facilite l'évaporation d'eau de mer dans des conditions anormal de température et de pression.
- **2 condenseurs d'éjecteur(GE2111.d) et(GE2112.d) :** pour condensé les incondensables soutiré du bloc.
- **2 filtres d'eau de mer:** pour arrêter les matières en suspension trouve dans l'eau de mer avant l'entrée dans le bloc.
- **4 pompes :** une pompe de saumures (GP2107) et une pompe de distillats(GP2105) et une pompe d'injection d'anti tartre et anti mousse(GP2114) et une pompe de condensats(GP2108).
- **un bac d'anti tartre et anti mousse.**
- **un bac d'acide sulfurique (BS12).**
- **une chaudière :** pour la production de vapeur 25 Bar et 210 °C nécessaire pour le bloc

Bacs des stockages : on a 5 bacs de stockages d'eau dessalé avec une capacité de 5000 m³ pour chaque bac i.e 25000 m³de stock.

1.3.1.c. Section eau déminéralisée:

Elle a pour but de production d'eau déminéralisée nécessaire pour les autres structures et aussi pour la section chaudière. Cette section est composée de :

- Deux chaînes de production d'eau déminérée.
- un bac H_2SO_4 avec 2 pompes volumétrique.
- un bac $NaOH$ avec 2 pompes volumétrique.
- un bac de morpholine avec 2 pompes volumétrique.
- Deux bacs de stockage d'eau déminérée.
- Deux baches retour de condensats.
- un condenseur atmosphérique.
- un circuit de refroidissement (aère).
- salle des pompes.

1.3.1.c.1. Chaîne de production eau déminérée : a une capacité de production de $70 \text{ m}^3/\text{h}$ et elle est composée de :

- un filtre à charbon actif : pour faire transformé le chlorure libre en HCL très dilué.
- un échangeur d'ion a lit mixte : on a un mélange des résines cationiques et anioniques a comme but d'éliminer les ions positif et négatif de l'eau dessale pour le rendre eau déminérée avec une conductivité inférieure a 1 Ms.
- **Un bac H_2SO_4 avec 2 pompes :** pour la régénération des résines cationique.
- **Un bac $NaOH$ avec 2 pompes :** pour la régénération des résines anionique.
- **Un bac morpholine avec 2 pompes :** pour l'augmentation de PH d'eau déminérée
- **Bac de stockage d'eau déminérée :** on a 2 bacs de stockages d'eau déminérée avec une capacité de stockage de 1250 m^3 pour chaque bac.
- **Bâches retour de condensats :** si un bache qui est remplie avec les retours des condensats et de l'eau déminérée et tout cette eau est pour alimentions de la chaudière et on a 2 baches.
- **Un condenseur atmosphérique** pour récupérer l'excès de vapeur de 0.7 bar.
- **Un circuit de refroidissement (aéro) :** a comme but de refroidir l'eau nécessaire pour le refroidissement des équipements.

1.3.2. Section chaudière :

Elle a pour but de production de la vapeur 40 bar et 5 bar et 0.7 bar nécessaire pour les autres structures et aussi pour toutes les sections de la CU II, Cette section est composée de :

- Trois chaudières.
- Trois bâches alimentaires.
- Quatre pompes alimentaires
- Un bac de morpholine et 2 pompes.
- Un bac de sulfite de sodium et 2 pompes.
- Un bac de phosphate trisodique et 2 pompes.
- Un barillet de démarrage.
- Un barillet de service 40 bar.
- Un barillet de 5 bars.
- Un barillet de 0.7 bar.

1.3.3. Section turbo-alternateur :

Elle a pour but de production d'électricité nécessaire pour alimenter toute l'entreprise. Cette section est composé de :

- une turbine à réaction ou a contre pression (10MVA).
 - une turbine à action ou à condensation (18 MVA).
- Avec :
- 2Réducteur à engrenage a chevron : « SIEMENS T80 »
 - 2 Alternateur triphasé synchrone



Figure 2 : Turbo-alternateur (10 MVA)

1.3.3.a. La Turbine à vapeur :

❖ Caractéristique de fonctionnement

-puissance : 7845 kW

-vitesse : 9000t/m

❖ Caractéristiques de construction

-TYPE DE LA TURBIN : G 400

-diamètre moyen : 470 mm

-langueur des ailettes : 32 mm

-Nombre d'étages suivants : 19

-langueur des ailettes : 70mm

-Lubrification des paliers : huile



Figure 3 : La turbine

1.3.3.b. Réducteur à engrenage a chevron : « SIEMENS T80 »

-type : T80

-forme de construction : traine parallèle hélicoïdal double

Rapport de vitesse : 5.33

-poids : 43 t



Figure 4 : Réducteur à engrenage en double « SIEMENS T80 »

1.3.3.c. Alternateur :

-Marque : CEM

-Alternateur triphasé synchrone 10,000 kVa

-Vitesse : 1500



Figure 5 : Alternateur

1.3.4. Les compresseurs d'air :

1.3.4. a. Section des compresseurs :

Elle a pour but de production d'air de service et l'air instrument nécessaire pour toutes les sections de la CU II.

Cette section est composé de :

- Des filtres : éliminer les matières en suspension.
- Des compresseurs d'air a doublé étage : pour compresser l'air et augmenté sa pression à 7 bars
- Un ballon d'air de service : pour stockée l'air humide nécessaire pour le l'air de service.
- Deux sècheurs d'air d'instrument : pour sécher l'air (la lamine qui absorbe l'humidité)
- Un ballon d'air de contrôle : pour stockée l'air sec nécessaire pour les instruments.

1.3.4. b. Production :

Cette section produire :

- ❖ **L'air de service** : utiliser pour le nettoyage par soufflage
- ❖ **L'air instrument** : il est important dans l'industrie surtout pour l'ouverture et fermetures des vannes.



Figure 6 : Compresseur d'air

1.4. Conclusion :

Durant notre stage à la section turbo alternateur et compresseur d'air au niveau de centrale et utilité II, nous avons acquis beaucoup de connaissance et nous avons montré :

- L'importance de la section turbo-alternateur dans le complexe
- L'importance de l'air instrument et l'air de service dans l'industrie

Dans cette étude, nous avons donné des bases à l'opérateur pour permettre une meilleure compréhension des turbines à vapeur au niveau de centrale utilité – FERTIAL – Annaba.

Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les stratégies de maintenance

2.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons évoquer quelques notions de base, afin de mettre en évidence l'importance de la modélisation des stratégies de maintenance dans le contexte industriel. Plus particulièrement, il est question ici de présenter la fonction Maintenance ainsi que l'application de la méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité afin de rendre compte des enjeux du travail de recherche répondant ainsi aux problématiques actuelles rencontrées dans le monde industriel.

2.2. La fonction Maintenance : un processus stratégique

2.2.1. Qu'est-ce que la maintenance ?

Au sens strict du terme, la maintenance agit sur les biens et considère l'ensemble des opérations d'entretien destinées à accroître la fiabilité ou pallier des défaillances [1]

Plus généralement, elle fait partie d'un ensemble d'actions effectuées pour que l'entreprise puisse prospérer. En effet, les installations industrielles sont perturbées, tout au long de leur exploitation, par des dysfonctionnements qui affectent les coûts de production, la qualité des produits et des services, la disponibilité, la sûreté, la sécurité des personnes...

L'objectif de la maintenance est de limiter les effets de ces perturbations afin d'atteindre les performances exigées et des actions sont élaborées de manière à :

- limiter les indisponibilités,
- garantir la qualité des produits et des services,
- maîtriser les coûts,
- protéger les personnes, l'environnement et les biens.

2.2.2. Maintenance et performances

Dans certains secteurs industriels tels que l'énergie, les transports et l'aéronautique, les performances d'un système ou d'une installation considèrent non seulement les coûts relatifs à l'exploitation mais également, de par la nature des activités, la sûreté de fonctionnement au sens large.

La notion de sûreté de fonctionnement couvre les aspects de fiabilité, sécurité, maintenabilité et disponibilité. Elle représente l'ensemble des aptitudes d'un produit qui lui permettent de

disposer des performances fonctionnelles spécifiées, au moment voulu, pendant la durée prévue, sans dommage pour lui-même et son environnement [2].

2.2.3. Les stratégies de maintenance

Tous les équipements d'une installation industrielle sont soumis à des mécanismes de dégradation pouvant causer l'apparition des modes de défaillance des matériels, entraînant ainsi leur panne et d'éventuels effets sur le fonctionnement de l'installation [3].

Les mécanismes de dégradation peuvent être de plusieurs types : usure, fatigue, vieillissement, altérations physico-chimiques diverses, etc... Leur cinétique d'évolution (fonction du temps de fonctionnement, du temps calendaire ou encore du nombre de sollicitations) peut dépendre de plusieurs facteurs influents (conditions d'environnement et de fonctionnement, dégradation d'autres matériels, tâche de maintenance défiabilisante, etc...) [4].

Les modes de défaillance décrivent le dysfonctionnement d'un matériel par la fonction qu'il ne remplit plus. Cinq (05) modes de défaillance génériques sont définis, [5] : perte de la fonction, fonctionnement intempestif, refus de s'arrêter, refus de démarrage, fonctionnement dégradé.

Face à la diversité des matériels d'une installation et de leurs comportements, les responsables de maintenance doivent envisager de véritables stratégies. Ils peuvent décider de pratiquer une maintenance corrective à la suite de la défaillance d'un matériel, mais cela ne permet pas d'éviter les conséquences des pannes sur le fonctionnement du système. Une attitude plus offensive consiste à mettre en œuvre une maintenance préventive systématique selon laquelle la décision d'intervenir précède l'apparition du dysfonctionnement. Cela permet de diminuer le nombre de défaillances et induit un gain économique substantiel, conséquence de la différence entre les coûts générés par l'intervention et la disponibilité qu'elle occasionne.

En limitant, voire en empêchant, les défaillances de cette manière, on court toutefois au risque de dépenses excessives et d'indisponibilités pour maintenance inutiles. Il est donc nécessaire de régler les paramètres de la politique de manière adéquate, [6].

2.2.4. Méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance

2.2.4.a. MSG-3 : La méthode de l'industrie aéronautique

L'objectif majeur du MSG-3(Maintenance Steering Groupe) est de définir la maintenance qui permet d'assurer la sécurité des avions. Si la sécurité est l'objectif premier, le transport

aéronautique est fortement soumis aux lois du marché et le critère économique est aussi pris en compte. Il n'apparaît cependant pas comme l'objectif majeur de la méthode.

Le principe du MSG-3 est d'organiser le choix des tâches de maintenance en fonction des conséquences des défaillances. Le but d'une action de maintenance préventive n'est pas directement d'assurer qu'un équipement soit en état de marche mais plutôt d'éviter les conséquences de son dysfonctionnement. Le cœur de la méthode est la logique de sélection des tâches de maintenance qui, en fonction des conséquences des défaillances, orientera vers les actions les plus efficaces et les plus économiques. Le MSG a très fortement inspiré les grands principes de la RCM (Reliability Centered Maintenance) et de l'OMF (Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité).

2.2.4. b. OMF : optimisation de la maintenance par la fiabilité

Cette méthode a vu le jour dans l'industrie aéronautique civile et militaire américaine des années 1980, sous le nom de RCM dans le but de maîtriser les coûts d'exploitation des avions. Développée par EDF à partir de 1990, généralisée ensuite sur les centrales nucléaires puis mise en œuvre sur des systèmes considérés comme les plus importants vis-à-vis des critères de sûreté, de disponibilité et de coûts d'exploitation.

La méthode a été adaptée pour être utilisée sur d'autres types d'installations (centrales thermiques au charbon, turbines à combustion, lignes de transport d'électricité, éoliennes...). Des sociétés prestataires de services en maintenance l'ont transféré à d'autres secteurs industriels (automobile, offshore...).

Cette approche permet de choisir une stratégie de maintenance préventive compte tenu d'objectifs de disponibilité, de sûreté et de coûts, en tenant compte des conséquences potentielles identifiées, à savoir l'occurrence des modes de défaillance et les effets sur le fonctionnement du système, ainsi que des données de retour d'expérience de dysfonctionnements de matériels.

a) Les différentes phases de la démarche OMF

La démarche se décline en quatre phases :

Phase 1 : la recherche des matériels critiques

En partant d'une division logique d'un système en groupements fonctionnels, il s'agit d'identifier les matériels qui peuvent s'avérer critiques vis-à-vis de la sûreté, de la disponibilité ou des coûts induits, puis de les sélectionner en fonction de leur niveau de criticité.

Phase 2 : l'analyse des défaillances des matériels critiques

Pour les matériels critiques, les causes et les modes de défaillance associés sont identifiés et hiérarchisés. Ainsi on peut identifier les défaillances significatives pour ces matériels critiques.

Phase 3 : l'analyse du retour d'expérience

La recherche des matériels critiques (phase 1) puis des défaillances significatives (phase 2) et la sélection des tâches de maintenance (phase 4) nécessitent une connaissance des mécanismes de dégradation conduisant éventuellement aux défaillances. Pour ce faire, on exploite les données archivées dans les différentes bases de données nationales et locales du retour d'expérience technique.

Phase 4 : la sélection des tâches de maintenances

Les phases précédentes ont permis de répondre à priori à la question fondamentale : sur quels matériels et pour prévenir quelles défaillances doit-on faire de la maintenance préventive ? Il s'agit alors de déterminer les tâches de maintenance et le programme qui y répond de manière optimale.

2.3. L'évaluation des stratégies de maintenance

Les stratégies de maintenance établies à l'aide de la méthode OMF s'appuient bien souvent sur des avis d'experts. Une fois les modes de défaillance critiques des matériels identifiés, ces derniers proposent des tâches de maintenance préventives efficaces, applicables et économiques. Les responsables de maintenance peuvent ensuite établir des stratégies en se basant sur ces propositions, ainsi que sur leur bon sens et leur intuition et en s'appuyant, lorsque cela est possible, sur des informations quantitatives issues des données de REX (Retour d'expérience) et de calculs déterministes ou probabilistes. Ils doivent effectuer des choix parmi les différentes options concernant la nature de la maintenance (préventive ou corrective), le type de tâches (contrôle, test, inspection, remplacement, etc...), leur fréquence de réalisation, le niveau d'intervention (réparation sur place, en atelier, chez le constructeur, etc...).

Cependant, de par la nature aléatoire des défaillances, il n'est pas aisé de comparer les différentes alternatives possibles sur des bases quantifiées. Il est difficile d'évaluer en termes de disponibilité, de niveau de sûreté, et de coûts, ce que donnera l'application d'un programme de maintenance sur plusieurs années et les décisions sont généralement prises à partir d'informations qualitatives.

Les stratégies de maintenance issues de la démarche OMF sont complexes dans la mesure où elles peuvent être composées de tâches de maintenance diverses, et peuvent ne pas reposer sur une structure simple. D'autre part, les systèmes maintenus par ces programmes sont des systèmes multi-composants, avec des dépendances entre les matériels, et la présence de plusieurs mécanismes de dégradation et modes de défaillance éventuellement en compétition pour concourir à leur défaillance.

Ces difficultés peuvent être des obstacles à l'évaluation quantitative des stratégies de maintenance. Elles doivent être affrontées pour pouvoir répondre aux problématiques industrielles actuelles.

2.4. L'impact d'une politique de maintenance

Les responsables de maintenance doivent faire face à plusieurs difficultés pour justifier leurs décisions concernant les tâches de maintenance préventive. Des questions se posent quant aux effets de la politique établie, en termes de coûts et de disponibilité, et quant à la rationalité des choix effectués. Il est souvent plus facile d'évaluer les dépenses relatives aux tâches de maintenance que les bénéfices qui en découlent. C'est pourquoi il est nécessaire de pouvoir apporter un outil d'aide à la décision de maintenance à caractère quantitatif.

Comme le décrit la figure II.1, les performances d'un programme de maintenance défini par le processus OMF peuvent être obtenues après plusieurs années d'application, et entraîner éventuellement des modifications pour la mise en œuvre d'un nouveau programme [7]. S'il est plutôt simple de comparer la différence économique entre l'ancien programme de maintenance préventive et le nouveau, il reste difficile d'évaluer les dépenses évitées de maintenance corrective ainsi que les gains obtenus en termes de disponibilités suite aux modifications d'amélioration. Pour éviter d'attendre à nouveau plusieurs années d'application avant d'obtenir ces informations, il semble nécessaire de pouvoir prédire l'évolution de la fiabilité des matériels de même que les conséquences de la mise en place du nouveau programme. Cette étape passe par la modélisation et la simulation du programme, avant son exécution, pour laisser place à de possibles modifications ultérieures (figure 7).

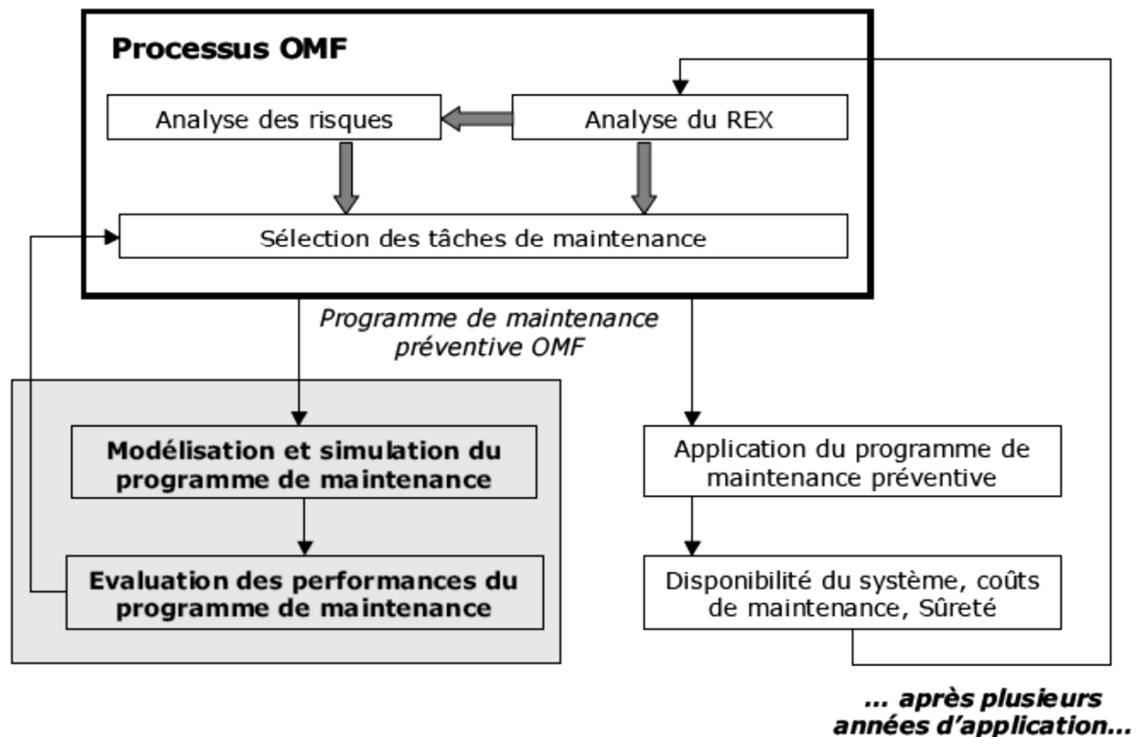


Figure 7: L'évaluation des performances d'un programme de maintenance de type OMF

2.5. L'impact des conditions d'exploitation

L'utilisation des installations industrielles peut être soumise à des modifications pour répondre à des objectifs différents. Ainsi, l'ouverture du marché de l'énergie, la demande croissante de production et la prise en compte des contraintes environnementales telles que les émissions de CO₂, ont un impact sur les conditions d'utilisation des centrales de production.

Par exemple, certains systèmes peuvent fonctionner moins longtemps durant l'année mais subir un nombre de démarrages et d'arrêts plus important. Ces effets sont évidemment reportés sur les mécanismes de dégradation des différents matériels et ont de ce fait un impact sur la disponibilité et les coûts d'exploitation de l'installation. En connaissant les effets des conditions d'exploitation sur les performances du système, on peut quantifier l'impact d'une modification envisagée et décider alors d'optimiser le profil d'utilisation ou d'adapter le programme de maintenance aux nouvelles conditions de fonctionnement. Pour cela, il est nécessaire de décrire la globalité du comportement des matériels, comme le montre la figure 8, de manière à faire apparaître l'impact des conditions d'utilisation sur l'évolution des dégradations et ainsi l'occurrence des modes de défaillance en prenant en compte les tâches de maintenance réalisées [8].

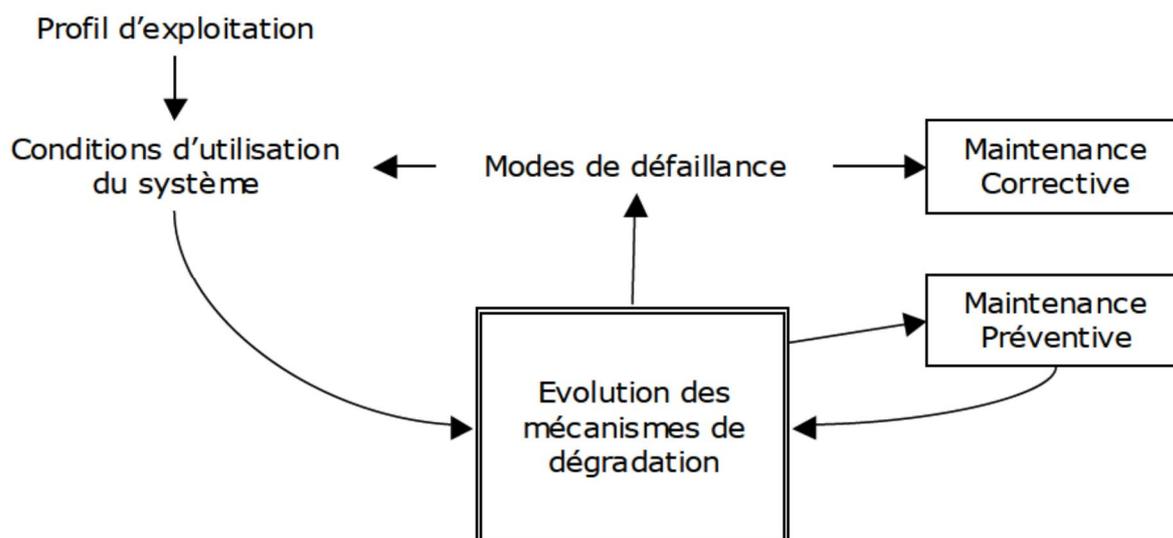


Figure 8 : Relation entre le profil d'exploitation et le comportement des matériels d'un système maintenu.

2.6. La hiérarchisation des tâches de maintenance

La gestion des ressources peut être un obstacle à l'application d'un programme de maintenance défini : les responsables de maintenance ont un nombre de ressources limité pour réaliser à la fois les tâches prévues dans le cadre de la politique de maintenance préventive et les tâches de maintenance corrective.

Suite à des contraintes budgétaires, ou autre situation créant une indisponibilité des ressources de maintenance, ils peuvent être amenés à revoir le programme établi et repousser, suspendre, voire annuler la réalisation de certaines tâches. Il faut être capable d'identifier attentivement les tâches qui pourraient être différées sans entraîner des conséquences inacceptables pour les performances de l'installation.

Il est alors nécessaire de pouvoir hiérarchiser les tâches en fonction de leur valeur ajoutée et des risques qu'elles permettent d'éviter. Cela peut être fait à l'aide d'un indicateur calculé en évaluant les conséquences induites par l'annulation de la tâche ou par la modification du programme initial [9].

2.7. L'état des matériels

Les installations vieillissantes sont soumises à des opérations exceptionnelles de maintenance ou de rénovation, rares, au coût élevé et la plupart du temps prévues. Cependant, si plusieurs matériels sont concernés, on peut devoir choisir celui qui est prioritaire du point de vue de la rénovation afin de limiter les arrêts et dépenses importantes à un même instant. La connaissance de l'état du matériel est utile à la prévision de son comportement futur en

fonction des conditions d'exploitation, ainsi qu'au calcul du rapport coût/bénéfice induit par la rénovation et qui permettra de hiérarchiser les priorités.

Le classement peut être défini en se basant sur l'état du matériel à un instant donné. Pour cela, on prend en compte le comportement du matériel jusqu'alors, à savoir les phénomènes de dégradation et défaillances ainsi que les tâches de maintenance réalisées. On simule ensuite son comportement futur afin de caractériser cet état [8].

2.8. L'état de l'art de l'évaluation des stratégies de maintenance

Les premiers modèles de maintenance considèrent des systèmes mono-composants et des politiques de maintenance basées sur des structures simples. De telles approches impliquent des hypothèses de modélisation fortes entraînant une perte de réalisme, et donc d'intérêt, au niveau industriel pour des systèmes complexes. C'est pourquoi l'optimisation de la maintenance continue à faire l'objet de très nombreux travaux de recherche, avec le développement de nouveaux modèles et l'approfondissement de modèles existants, pour une meilleure prise en compte de la réalité et de la complexité induite par les systèmes et les politiques de maintenance étudiées.

Avec l'amélioration des techniques de calcul, les travaux ne considèrent plus seulement des systèmes mono-composants, mais des systèmes multi-composants. Par ailleurs, avec la complexification des stratégies de maintenance, de nouveaux modèles sont développés, notamment en ce qui concerne la maintenance préventive conditionnelle [8].

Les modèles de maintenance sont développés en accord avec les pratiques de maintenance industrielle. C'est pourquoi, avec la complexification des stratégies de maintenance, de nouvelles approches sont proposées [9].

2.8.1. Les modèles élémentaires

Les interventions de maintenance préventive systématique consistent en des remplacements et sont décidées et planifiées en fonction du temps. Les modèles dédiés à ce type de maintenance cherchent à trouver la date de remplacement optimale, optimisant les critères de coût et de disponibilité définis [8].

2.8.1.a. Modèles basés sur l'âge

Les politiques de maintenance basées sur l'âge, ou « *age-replacement policies* », prévoient le remplacement du système par un système neuf dans deux situations : après sa

défaillance ou après une durée de T unités de temps. En remplaçant le système avant qu'il ne soit défaillant, on limite ses pannes, et donc les coûts liés à son indisponibilité fortuite et à la réalisation de réparations correctives.

Ainsi, l'optimisation des politiques basées sur l'âge repose généralement sur la détermination du paramètre de décision T qui minimise le coût de maintenance, c'est-à-dire qui permette le meilleur compromis entre la maintenance préventive et la maintenance corrective [10].

La politique de remplacement strictement périodique est considérée comme la meilleure des politiques où la périodicité de remplacement est une variable de décision. Néanmoins, l'hypothèse faite d'un remplacement à neuf n'est pas totalement réaliste; de même, la structure de la politique empêche une planification sur le long terme puisque chaque défaillance décale les interventions suivantes.

2.8.1.b. Modèles de remplacement par blocs

Dans le cadre des politiques de remplacement par blocs, la règle de décision pour le remplacement du système n'est pas réinitialisée après un remplacement, contrairement aux politiques de type *age-based replacement*.

Le système est remplacé par un système neuf, de manière périodique, suivant un planning de la forme $T, 2T, 3T, \text{etc...}$ [11].

La défaillance du système entraîne son remplacement mais n'engendre aucune modification du programme préventif. Les interventions sont réalisées aux dates prévues, quel que soit le temps de fonctionnement du système. Cette politique est plus simple à gérer qu'une politique de remplacement basée sur l'âge mais présente le risque de remplacer des systèmes presque neufs. Son optimisation peut se faire selon un critère de coût et/ou de disponibilité en faisant varier la durée de la période T et le type de réparations effectuées.

2.8.2. Les modèles de maintenance conditionnelle

Avec l'application des méthodes basées sur la *Reliability Centered Maintenance*, les politiques de maintenance ne consistent plus en des remplacements purs mais s'intéressent à l'état du système. On parle alors de maintenance préventive conditionnelle, et les décisions de maintenance sont prises en fonction du niveau de dégradation du système [12].

Le principal avantage est de limiter les remises en état non nécessaires. Les gains substantiels qui sont associés la rendent objet de nombreux travaux de modélisation de maintenance.

2.8.2.a. Des politiques à limite de contrôle

Au sein des modèles de maintenance conditionnelle, ce sont les informations décrivant l'état de dégradation du système, comme par exemple la profondeur d'une fissure, qui sont à l'origine de la décision de remise en état du système [7]. On considère de ce fait les politiques de maintenance préventive conditionnelle comme des politiques à limite de contrôle. En effet, des tâches d'observation sont réalisées pour connaître le niveau de dégradation du système et ce dernier est remplacé si l'observation révèle que le niveau de dégradation est supérieur à un seuil de remplacement préventif fixé, ou si une défaillance apparaît.

L'objectif de ce type de travaux est de définir le seuil de remplacement préventif ainsi que la fréquence des tâches de surveillance du système qui optimisent les performances du système, en termes de coûts et de disponibilité. Ils reposent sur la modélisation de l'évolution de la dégradation du système jusqu'à sa probable défaillance, et non plus uniquement sur l'occurrence de la défaillance comme dans les modèles de remplacements purs.

Par ailleurs, les interventions de surveillance, ou inspections, sont prévues de manière périodique ou séquentielle en fonction des approches.

2.8.2.b. La modélisation des dégradations

Les politiques de type limite de contrôle s'intéressent à des systèmes qui se détériorent, par vieillissement ou usure par exemple des modèles associés reposent de ce fait sur la modélisation de l'évolution des mécanismes de dégradation pouvant entraîner l'apparition des modes de défaillance du système.

On peut noter que la dégradation est souvent modélisée par un processus stochastique croissant dans le temps assimilable à l'évolution aléatoire de la dégradation. Le système est défaillant si son niveau de dégradation dépasse un seuil fixe [13].

a) *Les politiques de surveillance non périodiques*

Lorsque le taux de défaillance est croissant il peut s'avérer avantageux de définir la date de la prochaine inspection en fonction de l'état de dégradation du système. Il est plus intéressant de surveiller régulièrement un système lorsque celui-ci commence à se dégrader de manière importante et de surveiller moins souvent un système qui est neuf. De ce fait, une stratégie d'inspections séquentielles est particulièrement efficace pour des systèmes en cours de dégradation [8].

2.9. Conclusion :

D'une façon générale, ce chapitre souligne l'impact de la maintenance sur les performances d'un système en termes de disponibilité, de sûreté et de coûts.

La méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité, associée aux démarches de maintenance conditionnelle et de durabilité, est en voie d'intégration au sein d'une approche d'asset management. Toutefois, les stratégies de maintenance sont majoritairement établies sur la base d'avis d'experts et non sur un critère quantifié, défini par exemple en termes de coûts et de disponibilité.

Chapitre 3 : Etat de l'art sur le groupe turbo-alternateur

3.1. Le groupe Turbo-alternateur

3.1.1. Généralité : La vapeur, produit par la chaudière, est transformée en électricité grâce à un group turbo-alternateur

- La vapeur entraine une turbine qui transforme l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique
- L'énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique à un alternateur

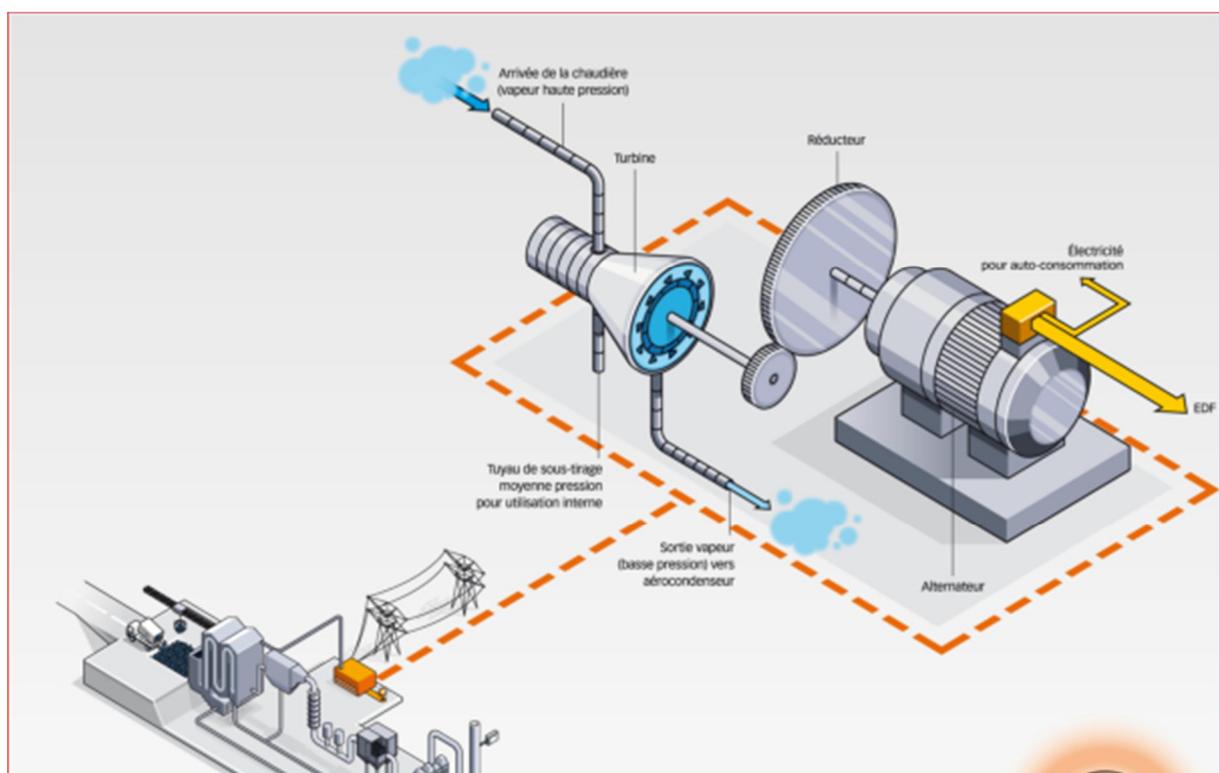


Figure 9 : Group turbo-alternateur

3.2. La turbine à vapeur :

La turbine à vapeur est une machine à vapeur rotative qui comprend essentiellement un générateur de vapeur, qui convertit l'énergie thermique de la vapeur en énergie cinétique et puis en énergie de rotation.

Sa manifestation moderne a été inventée par Sir Charles Parsons en 1884

Dans la turbine à vapeur, la vapeur commence par se détendre dynamiquement dans une tuyère, en acquérant de la vitesse, puis vient frapper les aubes d'une roue à qui elle cède sa force vive, en créant un couple. Il y a donc d'abord transformation d'énergie thermique en énergie cinétique dans la tuyère, puis d'énergie cinétique en travail dans la roue de la turbine.

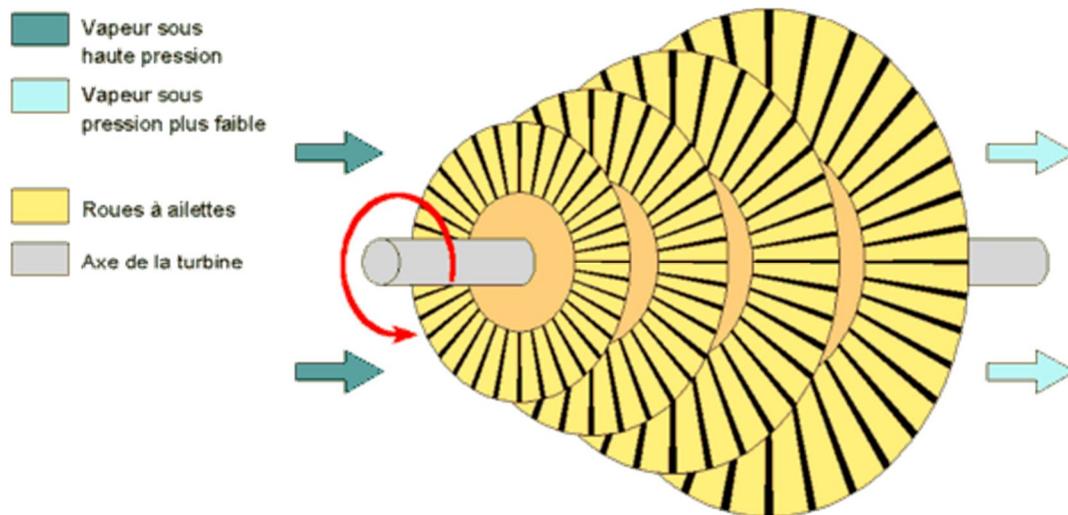


Figure 10 : turbine à vapeur

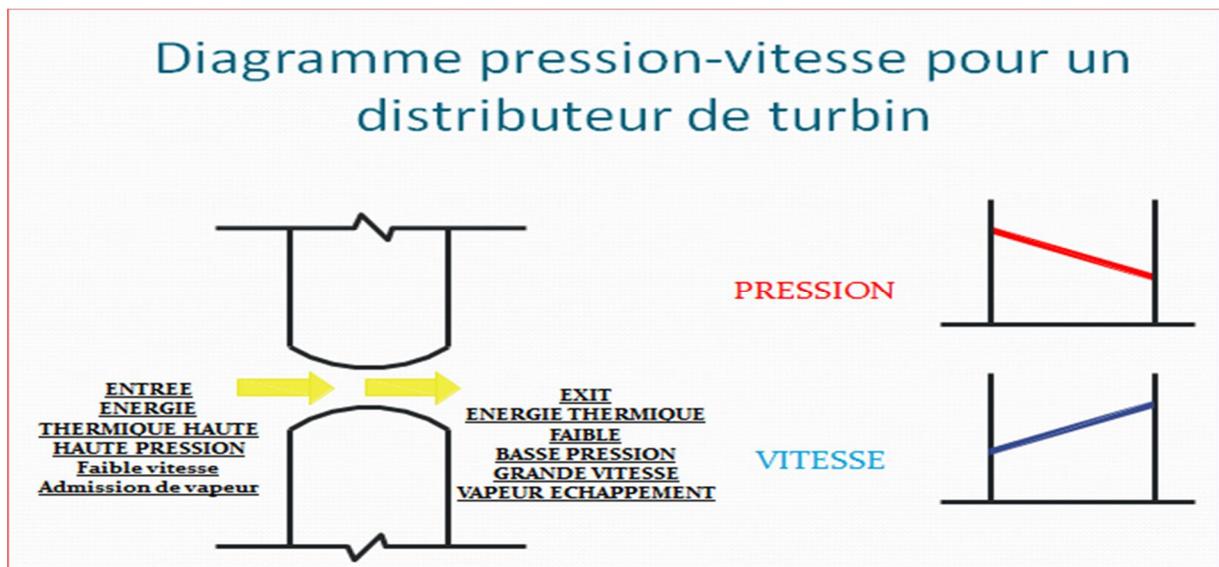


Figure 11 : diagramme pression-vitesse pour un distributeur de turbin

3.2.1. Classification des turbines à vapeur

La classification des turbines à vapeur peut être faite comme suit:

1. **Selon action de la vapeur**
 - Turbine à action
 - la turbine à réaction
 - Combinaison des deux
2. **Selon la direction de l'écoulement:**
 - Turbine à écoulement axial
 - Turbine à écoulement radial
3. **Selon nombre d'étages**
 - Turbine en une seule étape
 - Turbine multi-étape
4. **Selon le nombre de cylindres**
 - Cylindre turbine unique
 - Turbine à double cylindre
 - Trois turbines à cylindre
5. **Selon la pression de vapeur à l'entrée de la turbine:**
 - de turbine basse pression
 - de turbine moyenne pression.
 - la turbine à haute pression
 - Turbine à pression supercritique.

Les types les plus courants de la turbine à vapeur sont :

1. Turbine à action.
2. Turbine à réaction

La principale différence entre ces deux turbines se trouve dans la voie de l'expansion de la vapeur pendant qu'il se déplace à travers eux.

Dans la turbine à action, la vapeur se détend dans les buses et c'est la pression ne change pas comme il se déplace sur les lames. Dans la turbine à vapeur de la réaction en continu étendu lorsqu'il passe sur les lames et il n'y a donc tombé progressivement la pression au cours de l'expansion au-dessous de la pression atmosphérique

3.3. Alternateur :

Transforme l'énergie mécanique en électricité

Utilise dans toutes les centrales électriques quelle que soit la source d'énergie utilisée :

- Eau
- Vent
- Combustible fossile
- Combustible nucléaire

La conversion utilise la loi d'induction de Faraday : « un champ magnétique alternatif ou mobile induit un courant électrique dans un circuit conducteur. »

Alternateur = rotor tournant à l'intérieur d'un stator.

Le rotor (inducteur) est un électro-aimant

Le stator (induit) est un cylindre fixe avec des enroulements en cuivre dans lequel est génère un courant alternatif triphasé suite à la rotation du rotor.

La turbine est en liaison mécanique complète avec la partie tournante de l'alternateur (le rotor). Ce rotor crée un champ magnétique tournant qui donne naissance à un courant électrique dans le stator (partie fixe de l'alternateur) voir *Figure 12, 13, 14, 15*

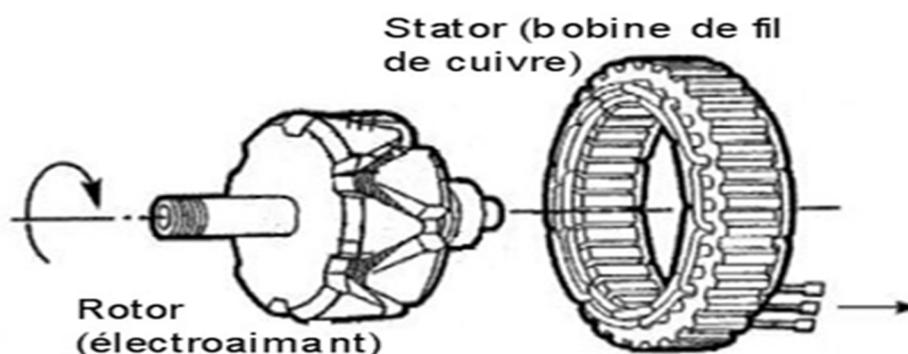


Figure 12 : Le rotor et le stator d'un alternateur



Figure 13 : Transforme l'énergie mécanique en électricité Etape 1

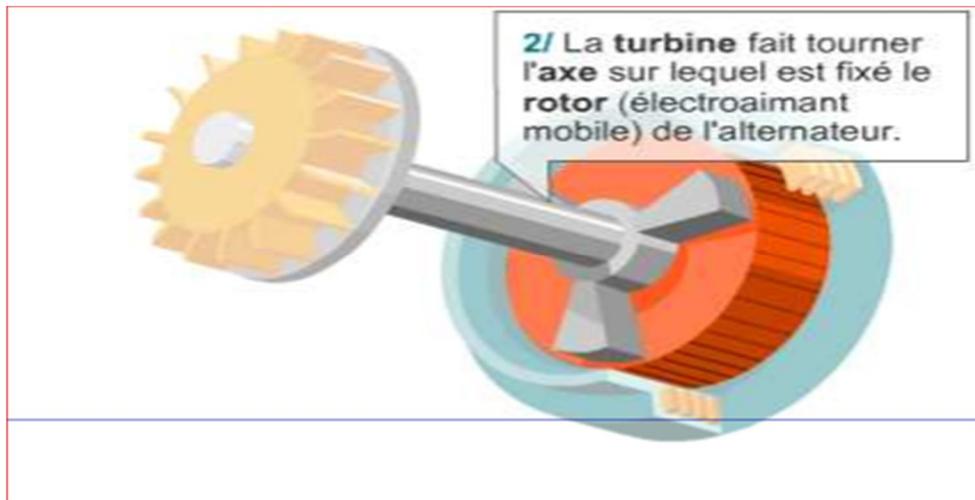


Figure 14 : Transforme l'énergie mécanique en électricité Etape 2

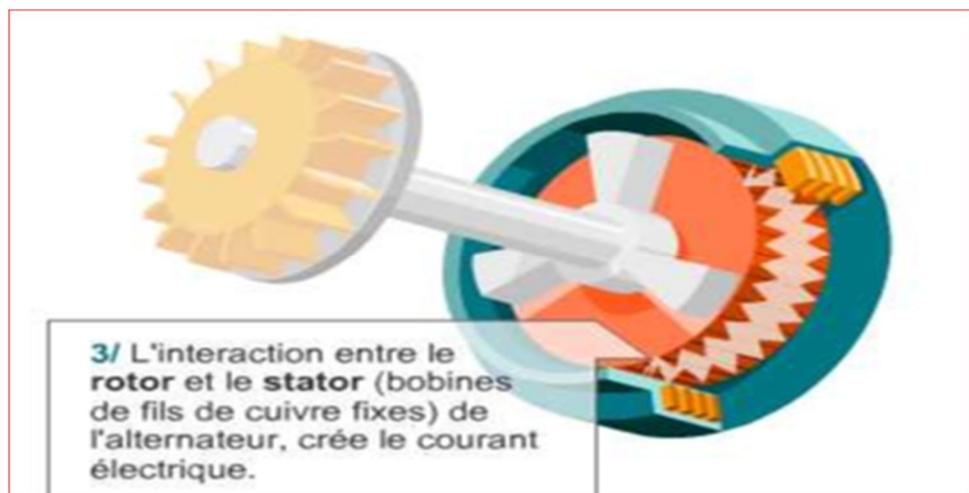


Figure 15 : Transforme de l'énergie mécanique en électricité Etape3

3.4. Les réducteurs de vitesse

Le principe de tout système mécanique est de transmettre et d'adapter une énergie mécanique depuis une source d'énergie vers une application donnée. Les premières machines construites afin de modifier des vitesses angulaires étaient des roues de friction ; ces roues étaient lisses et construites dans une matière qui avait un fort coefficient de frottement. Elles étaient maintenues en pression l'une contre l'autre, et le frottement qui se créait entre ces deux roues assurait la rotation des roues. Mais ce système ne permettait pas de contrôler correctement le rapport qui existait entre les vitesses angulaires d'entrée et de sortie. En effet les frottements qui existaient entre les roues n'étaient pas constants et le rapport entre les deux vitesses variait lui aussi. D'où l'idée de mettre autour de la roue des " obstacles ", des dents pour augmenter la précision de la transmission de l'effort entre les roues. Ainsi naissent les engrenages dotés de dents et qui permettent d'obtenir des rapports de transmission très précis.

Les engrenages constituent des organes de transmission et de puissance qui se sont largement répandus dans les domaines les plus variés de la construction mécanique. Dans les nombreuses machines, telles que les machines-outils, les véhicules, les appareils de levage, les installations de puissance des navires, etc..., les engrenages font partie des mécanismes principaux et auxiliaires. La large extension des engrenages est favorisée par leur rendement élevé, leur faible encombrement, leur sécurité de service, leur simplicité d'exploitation. Du fait de la diversité des conditions d'exploitation, la forme des éléments des engrenages et la construction des transmissions est très variée.

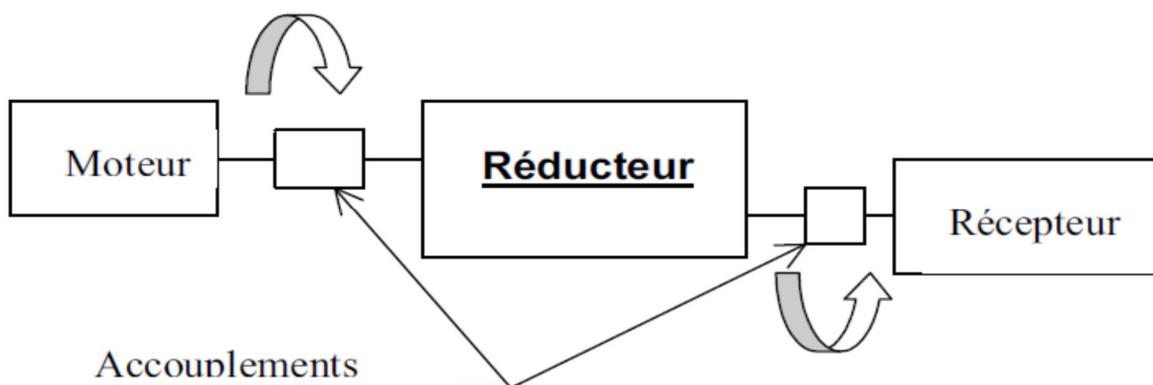


Figure 16 : L'emplacement d'un réducteur

3.4.1. Définition

Le nom de réducteur est réservé à un mécanisme séparé s'intercalant entre un moteur et un récepteur. Lorsque le moteur est fixé sur le carter du réducteur, l'ensemble porte le nom de motoréducteur.

3.4.2. Fonction

Un réducteur sert à réduire la vitesse d'un moteur avec transmission de la puissance motrice vers une machine réceptrice en absorbant le moins d'énergie.

Il permet d'augmenter le couple moteur afin d'entraîner en rotation un organe récepteur sous l'effet d'un nouveau couple

3.4. Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter l'état de l'art sur le groupe turbo-alternateur et la description des composants du groupe. Ceci permettra de mieux appréhender le reste du travail.

4. Chapitre 4 : Calcul du dimensionnement du réducteur

4.1. Introduction

L'étude d'un système des engrenages doit commencer par le calcul des engrenages, des puissances, pour aller vers la résistance de ce système et avoir la capacité pour la maîtrise des indicateurs de leur fiabilité et maintenabilité.

On a choisi de commencer cette partie par une phase de calcul de fiabilité et maintenabilité pour connaître l'état de notre réducteur.

4.2. L'état du réducteur

L'état de défaillances du réducteur GZ 1164.2 (T.A) en fonction du nombre de pannes

Tableau 1 : L'état de défaillance de réducteur

Rang	TBF (H)	Ni	$\sum ni$
1	20	1	1
2	24	2	3
3	48	2	5
4	96	1	6
5	168	2	8
6	216	2	10
7	240	3	13
8	308	1	14
9	432	1	15
10	456	1	16
11	458	1	17
12	480	1	18
13	504	1	19
14	624	2	21
15	672	1	22
16	720	2	24
17	744	1	25
18	816	1	26
19	840	1	27
20	912	1	28
21	1008	1	29
22	1032	1	30
23	1152	1	31
24	1248	1	32
25	1440	1	33
26	1464	1	34
27	1580	1	35
28	1704	1	36
29	2016	1	37
30	2208	1	38
31	2640	1	39
32	2712	1	40

4.2.1. Description de tableau :

Ce tableau contient les valeurs des Temps de bon fonctionnement, les n_i et le cumul de n_i et la fonction $F(n_i)$ qui nous permet de tracer le graphe de la loi de **Weibull**

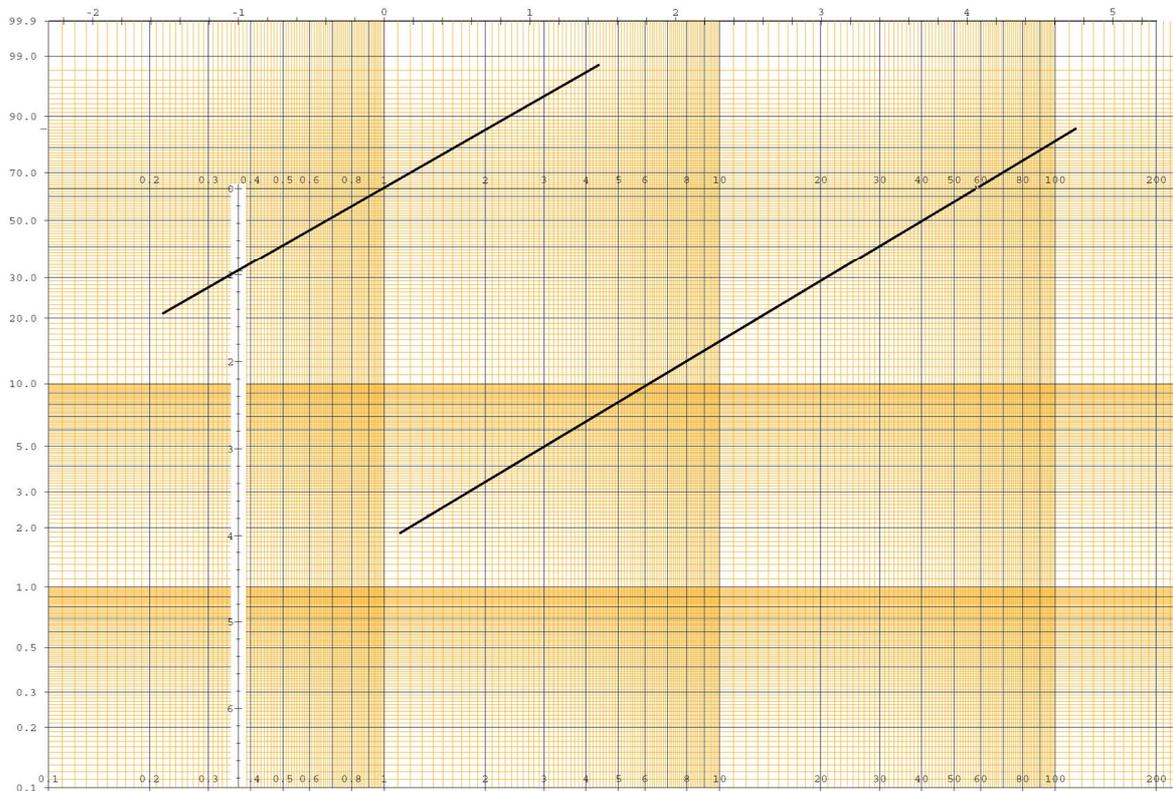


Figure 17 : Tracé de Weibull

4.2.3. Application de la loi de WEIBULL

Les paramètres de la Weibull selon le graphe :

- $\gamma = 0$ (la courbe est une droite)
- $\eta = 786.4h$
- $\beta = 0.97$

4.2.4. Test de KOLMOGOROV SMIRNOV :

- Après avoir calculé les D_n on a trouvé que :
- Le max de $|f(t_i) - F(t)| = D_{\max}$
- $D_{n, \max} = 0,06$

- $N = 32$, en posant que : $\alpha = 0,05$ et en se référant à la table du test K-S , $D_{n, \alpha} = 0,234$
- Il apparait que : $D_{n, \max} < D_{n, \alpha}$ donc, le modèle de Weibull est **accepté**.

Et la lecture sur la table de WEIBULL selon la valeur $\beta = 0.97$ nous donne :

- **A = 1.0234**
- **B = 1.0776**

4.2.5. Calcul de la moyenne des temps de bon fonctionnement :

$$MTBF = A. \eta + \gamma$$

$$MTBF = 1.0234 * 786.4 = 804.8 \text{ h} = 804\text{h et } 48 \text{ minute} = MTBF$$

4.2.6. La densité de probabilité :

$$f(t) = (\beta/\eta)(t-\gamma/\eta)^{\beta-1} e^{-(t-\gamma/\eta)\beta}$$

4.2.7. La fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - e^{-(t-\gamma/\eta)\beta}$$

4.2.8. La fonction de fiabilité :

$$R(t) = e^{-(t-\gamma/\eta)\beta} = 1 - F(t).$$

4.2.9. Le taux d'avarie :

$$\lambda(t) = \beta / \eta (t-\gamma/\eta)^{\beta-1}$$

Tableau 2 : Résultats de calcul des paramètres de la fiabilité

F(t)	R(t)	B	η	f	λ
0,001	0,999	0,97	786,4	0,00134	0,00138
0,033	0,967	0,97	786,4	0,00132	0,00137
0,064	0,936	0,97	786,4	0,00126	0,00134
0,122	0,878	0,97	786,4	0,00115	0,00131
0,200	0,800	0,97	786,4	0,00103	0,00129
0,248	0,752	0,97	786,4	0,00096	0,00128
0,271	0,729	0,97	786,4	0,00093	0,00128
0,332	0,668	0,97	786,4	0,00085	0,00127
0,428	0,572	0,97	786,4	0,00072	0,00126
0,445	0,555	0,97	786,4	0,00070	0,00125
0,447	0,553	0,97	786,4	0,00069	0,00125
0,462	0,538	0,97	786,4	0,00067	0,00125
0,478	0,522	0,97	786,4	0,00065	0,00125
0,550	0,450	0,97	786,4	0,00056	0,00124
0,576	0,424	0,97	786,4	0,00053	0,00124
0,601	0,399	0,97	786,4	0,00049	0,00124
0,612	0,388	0,97	786,4	0,00048	0,00124
0,645	0,355	0,97	786,4	0,00044	0,00123
0,656	0,344	0,97	786,4	0,00042	0,00123
0,685	0,315	0,97	786,4	0,00039	0,00123
0,720	0,280	0,97	786,4	0,00034	0,00122
0,728	0,272	0,97	786,4	0,00033	0,00122
0,765	0,235	0,97	786,4	0,00029	0,00122
0,791	0,209	0,97	786,4	0,00025	0,00122
0,834	0,166	0,97	786,4	0,00020	0,00121
0,839	0,161	0,97	786,4	0,00019	0,00121
0,860	0,140	0,97	786,4	0,00017	0,00121
0,880	0,120	0,97	786,4	0,00015	0,00121
0,917	0,083	0,97	786,4	0,00010	0,00120
0,934	0,066	0,97	786,4	0,00008	0,00120
0,961	0,039	0,97	786,4	0,00005	0,00119
0,964	0,036	0,97	786,4	0,00004	0,00119

➤ **La densité de probabilité :**

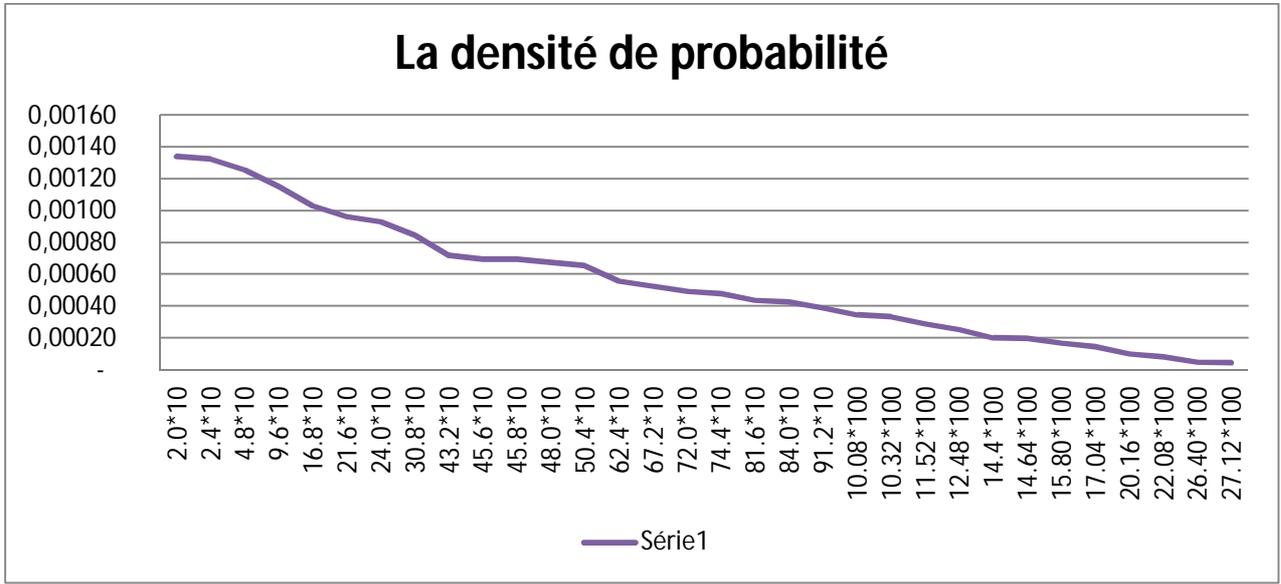


Figure 18 : la densité de probabilité

➤ **La fonction de répartition :**

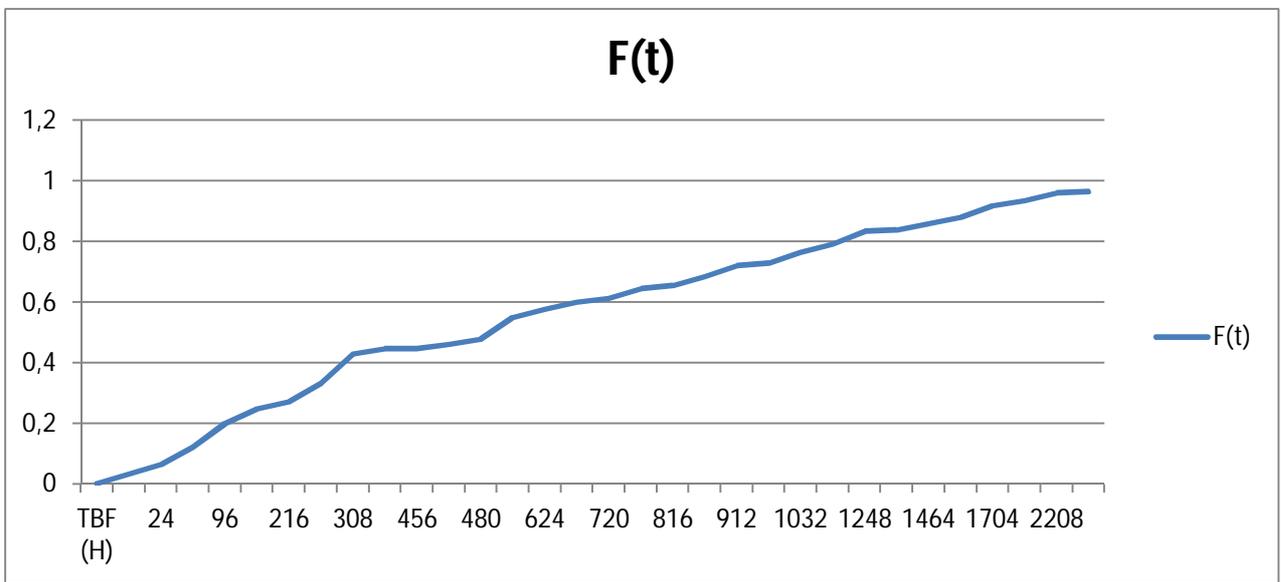


Figure 19 : La fonction de répartition

➤ **La fonction de fiabilité**

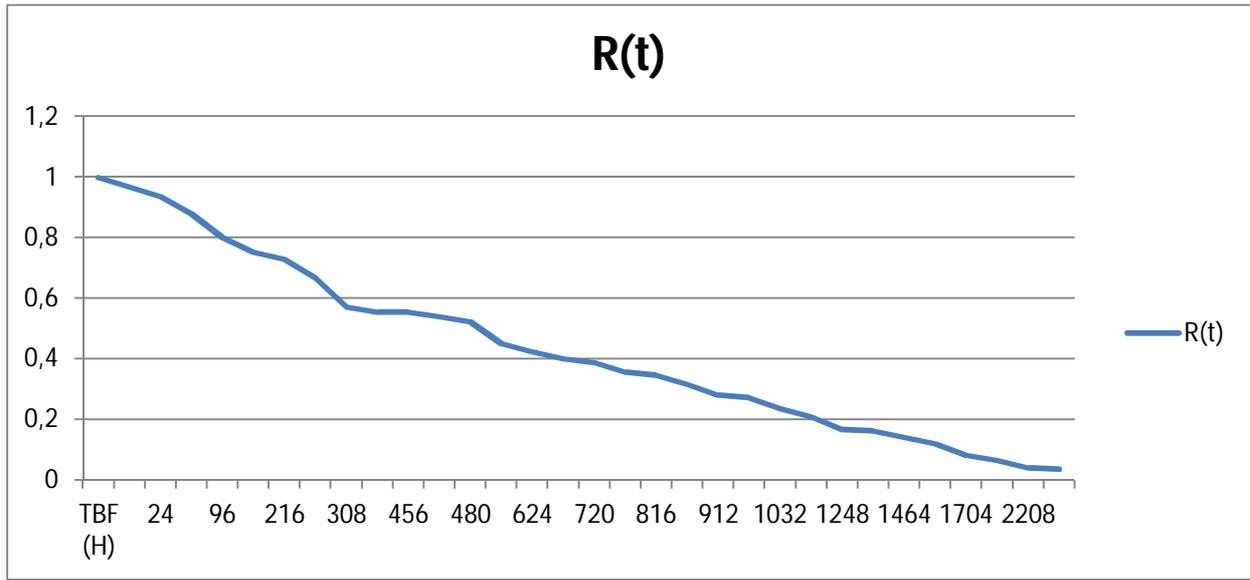


Figure 20 : La fonction de fiabilité

➤ **Taux de défaillance**

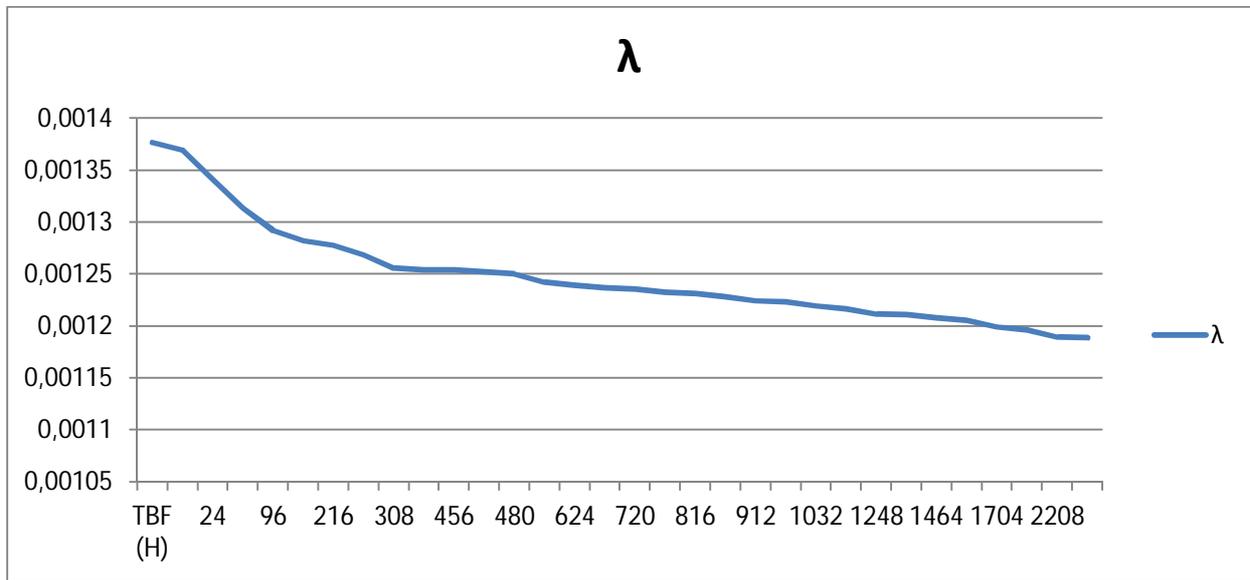


Figure 21 : Taux de défaillance

4.2.10. Calcul de maintenabilit

Choi de la loi : loi log-normale $\ln(m, \sigma)$

Les paramètres :

$$m = \frac{\sum \ln TTR}{ni}$$

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum (\ln TTR - m)^2$$

$n=41$

$\sum TTR = 4301$ (h)

Application numerique :

la moyenne $m= 4.72$

l'écart- type $\sigma= 0.59$

4.2.11. La densité de probabilité de réparation

$$g(t) = \frac{1}{\sigma TTR} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-1/2 \left(\frac{\ln TTR - m}{\sigma} \right)^2}$$

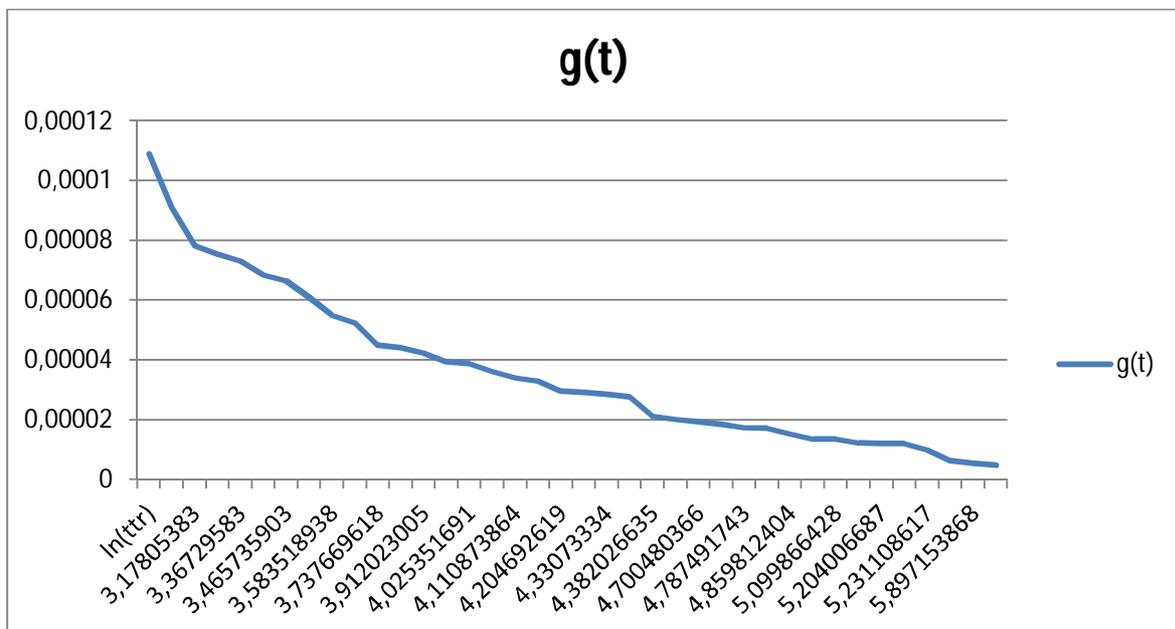


Figure 22 : Densité de probabilité de réparation

Tableau 3 : Calcul de la loi log normale

TTR (H)		ni	ΣNI	g(t)
20		2	2	0,000109
24		1	3	9,1E-05
28		1	4	7,82E-05
29		1	5	7,55E-05
30		1	6	7,3E-05
32		1	7	6,85E-05
33		1	8	6,64E-05
36		1	9	6,1E-05
40		1	10	5,49E-05
42		1	11	5,23E-05
49		1	12	4,49E-05
50		2	14	4,4E-05
52		1	15	4,24E-05
56		1	16	3,94E-05
57		1	17	3,87E-05
61		1	18	3,62E-05
65		1	19	3,4E-05
67		1	20	3,3E-05
75		1	21	2,95E-05
76		1	22	2,91E-05
78		1	23	2,84E-05
80		1	24	2,77E-05
105		1	25	2,11E-05
110		1	26	2,02E-05
115		1	27	1,93E-05
120		1	28	1,85E-05
128		1	29	1,74E-05
129		1	30	1,72E-05
146		1	31	1,53E-05
164		1	32	1,36E-05
166		1	34	1,34E-05
182		1	35	1,23E-05
185		1	36	1,21E-05
187		1	37	1,19E-05
226		1	38	9,9E-06
364		1	39	6,18E-06
416		1	40	5,41E-06
478		11	41	4,72E-06

4.2.12. La fonction de répartition des temps de réparation:

$$\diamond G(t) = \int_0^t g(t) dt$$

Comme c'est la loi log-normale, elle n'a pas de solution analytique

Alors on utilise la table normale centrée réduite (annexe) avec $U = \frac{\ln TTR - m}{\sigma} = G(t)$

On obtient les résultats suivants :

Tableau 4 : Résultats de calcul de la fonction de répartition

G	TTR (H)
0,0091	20
0,0202	24
0,0367	28
0,0418	29
0,0475	30
0,0594	32
0,0655	33
0,0869	36
0,1190	40
0,1357	42
0,2005	49
0,2090	50
0,2296	52
0,2709	56
0,2810	57
0,3192	61
0,3594	65
0,3783	67
0,4522	75
0,4602	76
0,4801	78
0,4960	80
0,6700	105
0,6985	110
0,7257	115
0,7454	120
0,7823	128
0,7852	129
0,8413	146
0,8849	164
0,8888	166
0,9147	182
0,9192	185
0,9222	187
0,9591	226
0,9946	364
0,9973	416
0,9983	478

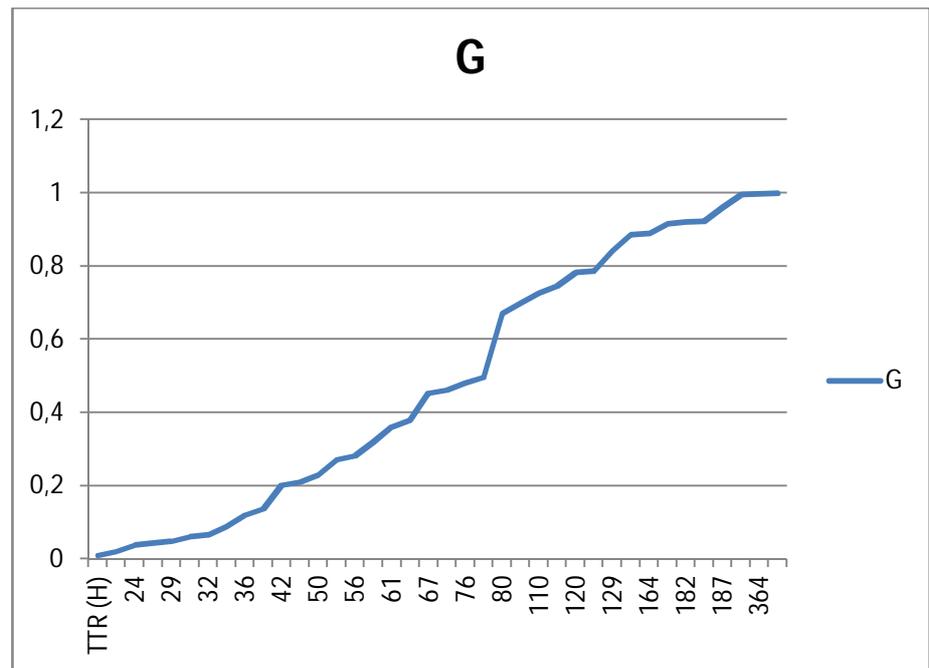


Figure 23 : La fonction de répartition

4.2.13. Calcul de MTTR :

$E(t) = MTTR = e^{m + \sigma^2/2}$

MTTR = 67.35h

Nous remarquons que la fiabilité au temps égal à la MTTBF= 804.8h h est de 35 % et la maintenabilité au temps MTTR = 67,35h est de 81%.

Ce qui montre une faible fiabilité. On choisit de faire une étude des engrenages et le calcul de dimensionnement avant d'aller vers l'étude de MBF (maintenance basée sur la fiabilité).

4.3. Transmission par engrenages

4.3.1. Introduction

Les engrenages servent à la transmission de mouvements de rotation et de moments entre des arbres dont les axes sont soit parallèles, soit perpendiculaires, soit encore concourants (fig24).

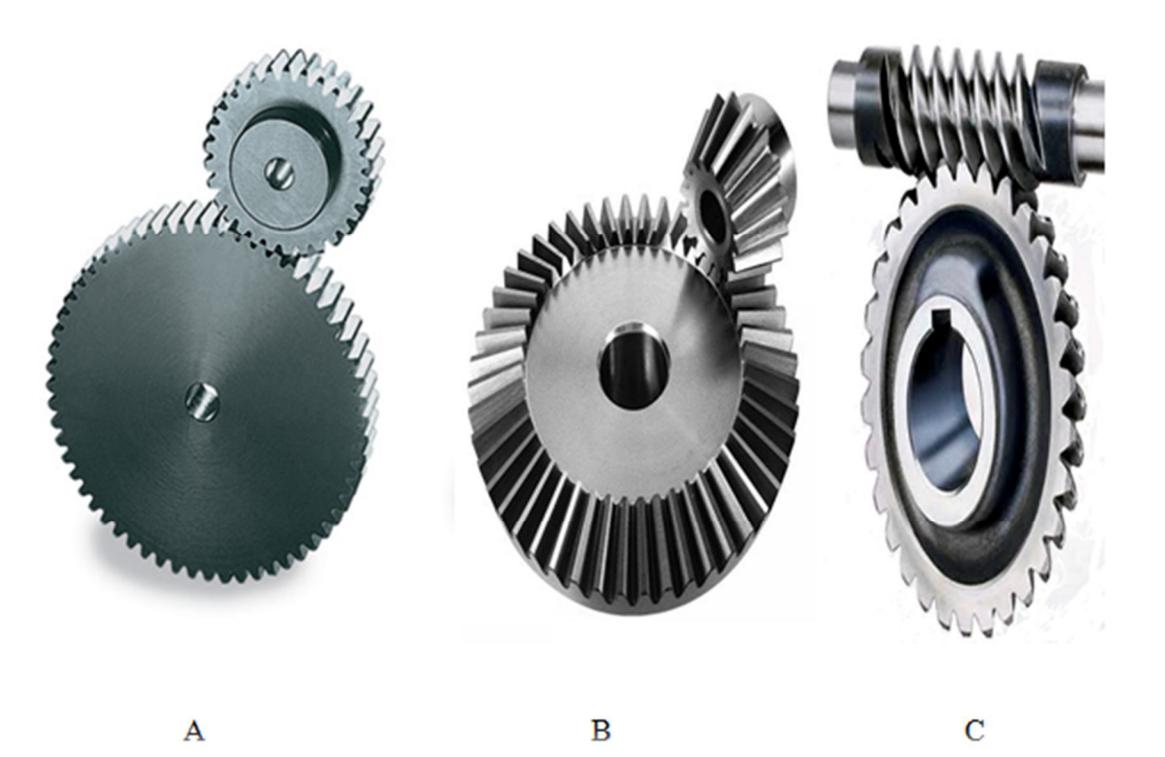


Figure 24 : Différents types d'engrenages

- A) Engrenages cylindrique à axes parallèles,
- B) Engrenages coniques à axes concourants,
- C) Engrenages à vis sans fin.

- Les avantages de cette transmission par rapport aux transmissions par chaînes et par courroies sont :
 - Rapport de transmission constant (pas de glissement) ;
 - Encombrement réduit ;
 - Rendement en général élevée ;
 - Sécurité de fonctionnement et longévité élevée

- Les inconvénients, eux, se résument en ce qui suit :
- Transmission rigide des efforts (ce qui nécessite souvent l'utilisation d'accouplements élastique) ;
 - Bruit ;
 - Entraxe fixé par les dimensions des roues dentées ;
 - Construction souvent coûteuse ;
 - Interchangeabilité limité.

D'après le profil de la denture, on distingue les dentures suivantes :

- Droite
- Hélicoïdale
- Roue double
- En chevrons
- En arc de cercle
- En spirale
- En développante de cercle

Voire les figures suivantes 25, 26, 27,28,

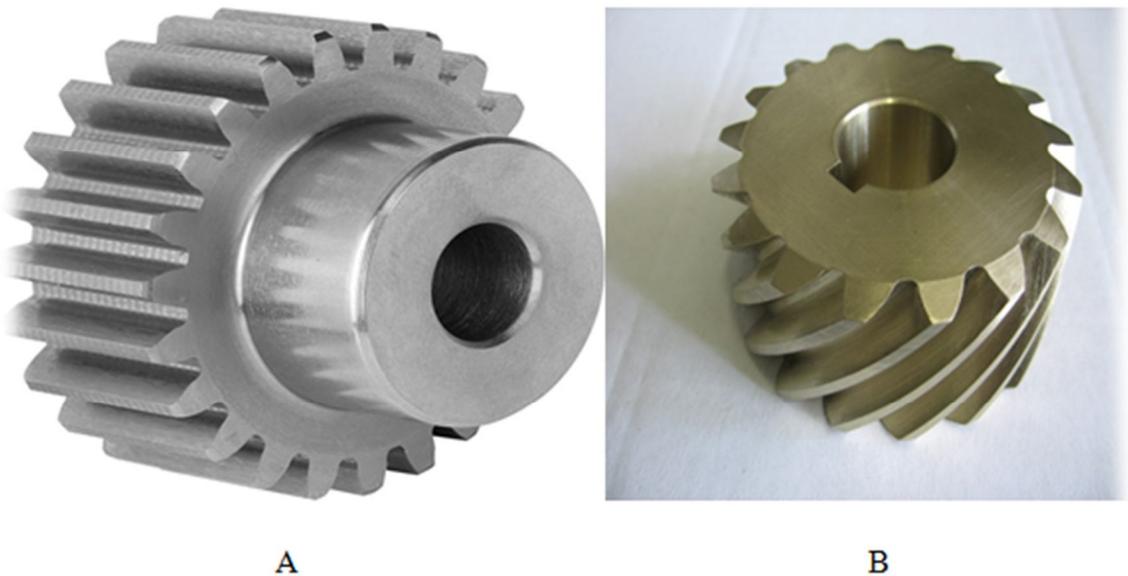


Figure 25 : A denture droit, B, denture hélicoïdale



Figure 26 : Denture en double



Figure 27 : Denture en chevron



Figure 28 : Denture en spirale

4.3.2. Notions sur les engrenages

On appelle généralement :

- Pignon : la plus petite des roues dentées ;
- Roue : une roue dentée extérieurement ;
- Couronne : une roue dentée intérieurement ;
- Crémaillère : un profil denté continu plan.

Le rapport de transmission i est le quotient de la vitesse angulaire de la première roue menante d'un train d'engrenage par celle de la dernière roue menée. Vu que $i = \omega_1 / \omega_2$ et comme on a, généralement $\omega = \pi * n / 30$, donc on peut écrire :

$$i = n_1 / n_2$$

n_1 : vitesse de rotation de la roue menante en tr/mn,

n_2 : vitesse de rotation de la roue menée en tr/mn.

Un engrenage est un mécanisme élémentaire constitué de deux roues d'engrenage, mobiles autour d'axes de position relative invariable, et dont l'une entraîne l'autre par l'action des dents venant successivement en contact.

Un train d'engrenage est une combinaison d'engrenages.

Un engrenage (ou train) réducteur est un engrenage (ou train d'engrenages) dont la vitesse angulaire de la dernière roue menée est inférieure à celle de la première roue menante.

4.4. Engrenages hélicoïdaux

Le cas des engrenages de notre réducteur

4.4.1. Engrenages hélicoïdaux à axes parallèles :

Les lignes des flancs des dents engrenages sont en forme d'hélice. Ces lignes sont inclinées par rapport à l'axe de la roue d'un angle β , appelé angle d'hélice

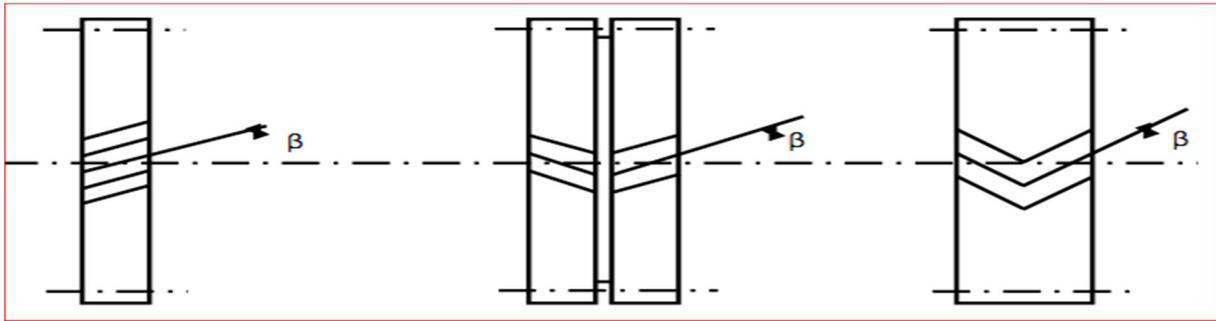


Figure 29 : Denture hélicoïdale

a) Simple

b) double

c) en chevrons

- Les avantages de ces engrenages par rapport aux cylindriques à denture droite sont :
 - Le fonctionnement est régulier et silencieux, car l'engrènement et le désengrènements se produisent graduellement.
 - Ces engrenages supportent de grandes charges car un plus grand nombre de dents se trouvent simultanément engrenées.
 - Ils sont appropriés pour les vitesses élevées.
 - Ils sont insensibles aux erreurs de formes de dents.
- Les inconvénients sont :
 - Le rendement est moins élevé à cause de l'inclinaison de la denture, qui elle donne naissance à des forces axiales engendrant des sollicitations supplémentaires au niveau des paliers des arbres, produisant des pertes par frottement.
 - Pour les mêmes nombres de dents et les mêmes modules, les diamètres et l'entraxe augmentent avec l'angle d'hélice
 - La poussée axiale se laisse éliminée par l'emploi de denture hélicoïdale double ou en chevrons *Fig29*

4.4.2. Grandeurs fondamentales :

4.4.2. a. Angle d'hélice et recouvrement

L'angle de l'hélice est mesuré entre la ligne de flanc de dent sur le diamètre primitif et l'axe de la roue et ses valeurs sont généralement :

- Pour une denture hélicoïdale simple ou double : $\beta \approx 10^\circ \dots 20^\circ$
- Pour une denture hélicoïdale en chevrons : $\beta \approx 30^\circ \dots 40^\circ$

Il est recommandé de choisir la valeur de β de telle sorte à avoir un bon recouvrement, nécessaire pour un fonctionnement régulier, et de basses force axiales.

La grandeur, qui caractérise la position inclinée de la dent relative par rapport à la largeur de la roue, est le recouvrement q , arc mesuré sur le diamètre primitif

$$q = b \cdot \tan \beta$$

β : angle de l'hélice en degré

b : largeur de roue en mm

4.4.2. b. Pas de module

En coupe normale, i.e. la coupe qui perpendiculaire à la direction des flancs de la dent, on peut mesurer, sur une denture normale en développante de cercle, l'angle de pression réel $\alpha_n = 20^\circ$ et le pas primitif réel p_n correspondant au module normal m_n . Les dents sont usinées avec des outils de coupe avec des modules normaux.

Sur la face frontale de la roue, on mesure le pas primitif apparent p_t , qui correspond au module apparent *figure 31*

$$p_t = m_t \cdot \pi = p_n / \cos \beta = m_n \cdot \pi / \cos \beta \quad \text{ou bien } m_t / \cos \beta$$

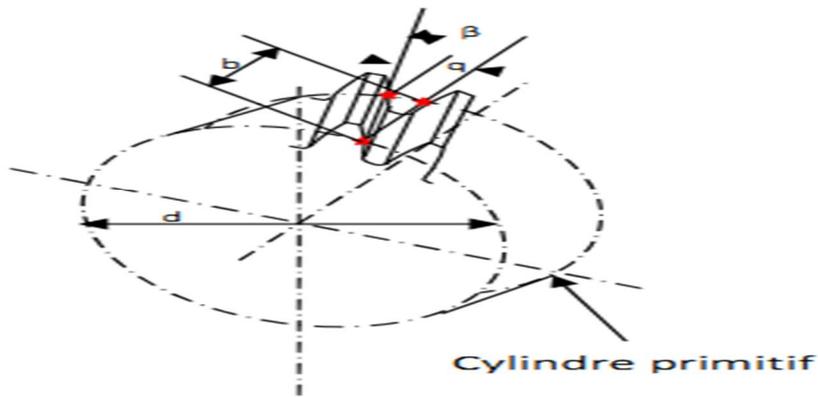


Figure 30 : Recouvrement d'une cylindrique denture hélicoïdale

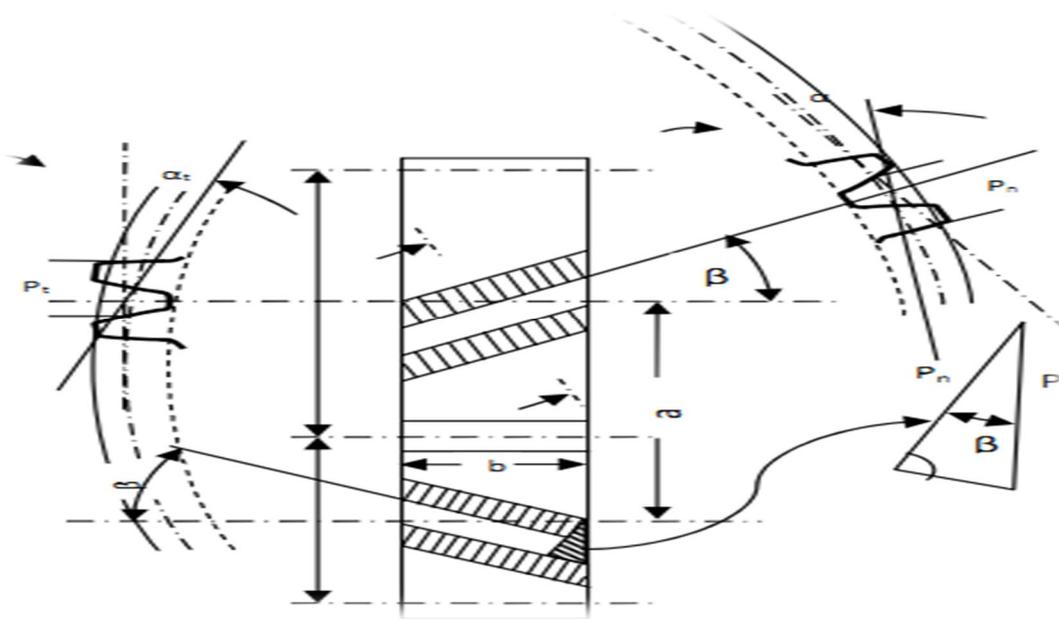


Figure 31 : Dimensions d'une roue cylindrique Denture hélicoïdale

4.2.2. c. Dimension de roues, entraxe (pour engrenage non déportés)

Les diamètres primitifs, de tête et de pieds ont mesurés sur la face frontale de la roue *figure 31*
 Pour une roue dentée extérieurement,

4.2.2. d. Caractéristiques géométriques :

Tableau 5 : Caractéristiques géométriques

Les dimensions géométriques	Formule
le diamètre primitif	$d=mt.Z =Z.mn/\cos \beta$
Le diamètre de tête	$da= d+2.mn$
Le diamètre de pied	$df=d-2. (mn+c)\approx d-2.4mn$
L'entraxe	$a=\frac{d1+d2}{2} = \frac{mt*(z1+z2)}{2} = \frac{mn*(Z1+z2)}{2.\cos\beta}$

4.5. Engrenement

4.5.1. Rapport de transmission

Le rapport de transmission d'un engrenage cylindrique à denture hélicoïdale est défini comme celui des engrenages cylindrique à denture droite, c'est-à-dire par $i=Z2/Z1 =\omega1/\omega2$; ou $z2, z1$ sont les nombre des dents des roues et $\omega1$ et $\omega2$ les vitesses correspondantes.

4.5.1. a. Angle de pression apparent

On distingue aussi l'angle de pression réel α_n et l'angle de pression apparent α_t . La relation entre ces deux angles est donnée en fonction de l'angle de l'hélice β :

$$\text{Tgat}=\text{tg } \alpha_0/\cos\beta$$

4.5.1. b. Nombre de dent virtuel

Pour la détermination de certaines grandeurs géométriques, et spécialement pour les roues à denture hélicoïdale déportée, il est nécessaire de remplacer la roue cylindrique à denture hélicoïdale par une roue cylindrique virtuelle à denture droite.9

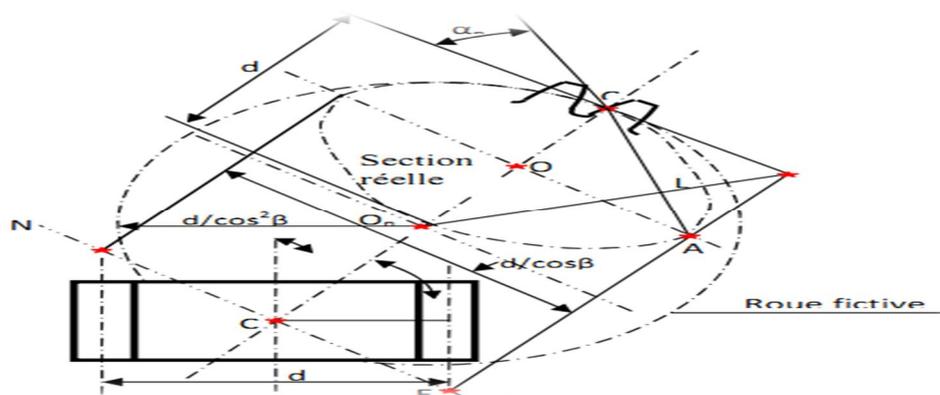


Figure 32 : Roue fictive

La figure (4.10) représente une roue hélicoïdale coupée suivant la normale à dent. On obtient ainsi la section réelle qui est une roue dentée elliptique de grand diamètre $D=d/\cos\beta$ et de petit diamètre $d=Z.mt$.

On remplace la roue elliptique par une autre roue virtuelle. La roue virtuelle a le même rayon de courbure r que l'ellipse au sommet du petit axe, c'est-à-dire dans la zone où les dents sont prises ; il peut être trouvé à l'aide du triangle OBC semblable au triangle ABC.

Ainsi le diamètre virtuel est donné par :

$$D=d/\cos^2\beta$$

Est comme $d_v=mn.Z_v$ et $d=mn.Z/\cos\beta$, on obtient le nombre de dents virtuel correspondant :

$$Z_v=Z/\cos\beta$$

4.5.1. c . Nombre de dents limite

Sachant que le nombre de dents limite pratique pour un engrenage cylindrique à denture droite non déportée est égal à 14, on peut donc écrire:

$$Z_{\beta\text{lim}}=14.\cos^3\beta$$

Le nombre de dents limite diminue avec l'augmentation de l'angle de l'hélice β ; ce nombre limite peut être tiré de la figure 33

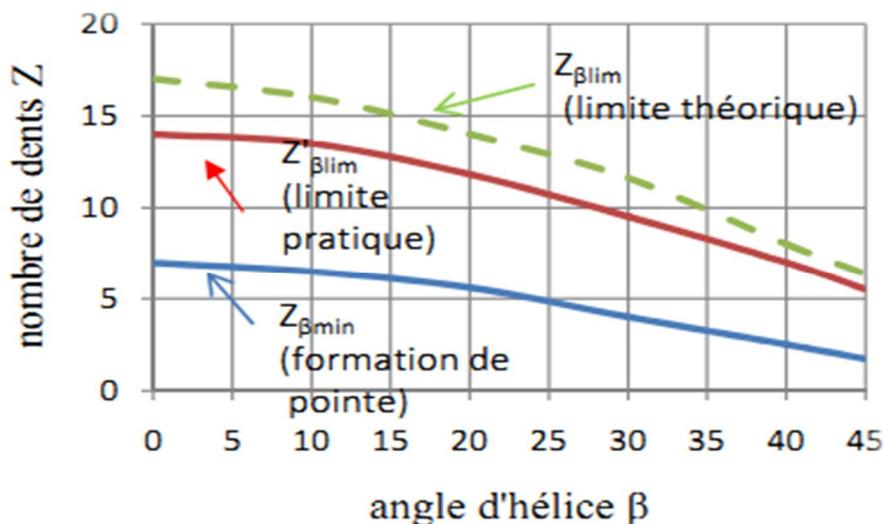


Figure 33 : Nombre limite des dents pour roue à denture hélicoïdale

4.6. Calcul de résistance

La force F_n se décompose en une force F' , perpendiculaire à la direction des flancs, et en une composante radiale F_r . la force F' se décompose, à son tour, en une force tangentielle F_t et axiale F_a .

Les forces	La formule
La force tangentielle F_t	$F_t = 2000.Mt.(K)/d$
La force axiale	$F_a = f_t.tan \beta$
La force radiale	$f_r = f_t.tan\alpha_n / \cos\beta$

α_n : Angle de pression réel ($\alpha=20$)

β : Angle d'hélice

Lorsqu'il s'agit d'engrenages V, les grandeurs d , β et α doivent être remplacées par les grandeurs correspondantes au cylindre de base et qui sont d_b ($d_b = d \cdot \cos \alpha$), β_b ($\tan \beta_b = \tan \beta \cdot d_b / b$) et α_x . mais comme la différence est insignifiante, la détermination des forces a lieu avec d , β et α_n .

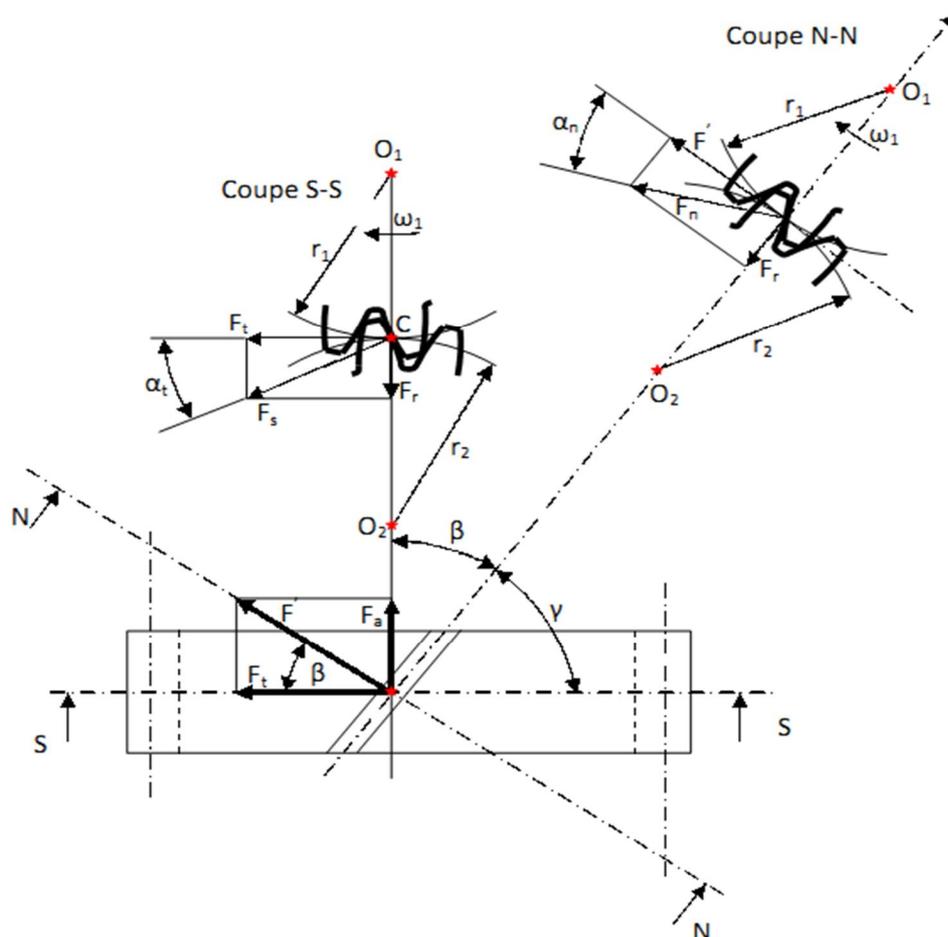


Figure 34 : Forces agissantes dans une roue cylindrique à denture hélicoïdale

4.7. Vérification de la résistance

4.7.1. Vérification de la résistance de la racine de la dent

Comme pour les engrenages cylindriques à denture droite la contrainte de flexion à la racine de la dent est :

$$\sigma_f = \frac{F_t}{b.m_n} . Y_f . Y_\varepsilon \leq [\sigma_f]$$

- F_t : force tangentielle en N ,
- b : largeur de dent en mm,
- Y_f : facteur de forme de dent en fonction du nombre de dents virtuel Z_{fv} et d'un éventuel quotient de déport x ,
- Y_ε : facteur de conduite
- $[\sigma_f]$: contrainte admissible de flexion en N/mm²

Comme pour les engrenages cylindriques à denture droite, pour pouvoir déterminer le facteur de conduite Y_ε , il faut d'abord connaître la qualité de la denture et déterminer le facteur auxiliaire q_l

- Si $q_l > 1/\varepsilon\alpha$, on obtient $Y_\varepsilon = 1$,
- Si $q_l \leq 1/\varepsilon\alpha$, on obtient $Y_\varepsilon = 1/\varepsilon\alpha$

4.7.2. Vérification de la résistance des flancs

Comme pour les engrenages cylindriques à denture droite, la pression de contact au point de roulement est :

$$P_{\max} = \sqrt{\frac{F_t}{b.m_n} \cdot \frac{u_1}{u}} . Z_M . Z_H . Z_\varepsilon \leq [P]$$

- F_t : Force tangentielle en N ,
- b : Largeur de la roue égale à la longueur de la ligne de contact en mm,
- u : Rapport de nombre de dents ; ($u=Z_1/Z_2$)
- d_1 : Diamètre primitif du pignon en mm
- Z_M : Facteur de matériau

- Z_H : Facteur de forme
- Z_ε : Facteur de répartition de charge
- $[p]$: Pression admissible en N/mm^2

La détermination de Z_ε passe par la détermination du facteur auxiliaire q_L

- Si $q_L > 1/\varepsilon\alpha$, on obtient $Z_\varepsilon = 1$
- Si $q_L \leq 1/\varepsilon\alpha$, on obtient $Z_\varepsilon = \sqrt{1/\varepsilon\alpha}$

Pour une qualité de denture comprise entre 8 et 12 et pour des petites jusqu'aux moyennes charges on peut poser $Z_\varepsilon = 1$ car on a en générale $q_L \leq 1/\varepsilon$.

4.8. Choix du rapport de transmission

Le rapport de transmission est choisi comme pour les engrenages cylindriques à denture droite

4.3. Rendement

A cause des grandes pertes de puissance causées par le frottement dans les paliers (effort axial) et un frottement un peu plus élevé dans les dents, les rendements des engrenages cylindriques à denture hélicoïdale sont $\approx 1...2$ % plus bas que ceux des engrenages cylindriques à denture droite.

4.9. Résultats et discussion

4.9.1. Calcul d'une paire de roues cylindriques à denture hélicoïdale :

Méthode de calcul : DIN 3990:1987 Méthode B (YF Méthode C)

	Roue 1	Roue 2
Puissance (kW)	7845.000	
Vitesse de rotation (1/min)	9000	1500
Couple (Nm)	8323.8	49942.8

4.9.1.a. Géométrie de dent et matériau

(Calcul de géométrie selon DIN 3960:1987)

Matériau

Pignon : 25CrMoS4, Aciers d'amélioration, allié, amélioré ISO 6336-5 Image 5/6 (MQ)

Roue : 25CrMo4, Aciers d'amélioration, allié, amélioré ISO 6336-5 Image 5/6 (MQ)

Tableau 6 : Géométrie de dent et matériau

	Roue 1	Roue 2
Entraxe (mm)[a]	800.00	
Tolérance d'entraxe ISO 286:2010		
Module normal (mm)[mn]	5	
Angle de pression réel (°) α	20°	
Angle d'hélice au cercle primitif (°) β	26°	
Nombre de dents Z	41	246
Denture chevron droite/gauche	Gauche /droite	
Largeur total de la roue (mm)	605	605
Largeur de la rainure intermédiaire (mm)	75	
Largeur de dent pour calcul (mm)	265	265
Qualité d'engrenage [Q-DIN 3961:1978]	6	
Diamètre intérieur (mm)	240	
Diamètre intérieur du bandage (mm)	860	

4.9.1.b. Dureté de la surface

Tableau 7 : Dureté de la surface

	Roue 1	Roue 2
Limite d'endurance - contrainte pied de dent (N/mm ²)	280	280
Limite d'endurance (pression hertzienne) (N/mm ²)	670	670
Résistance à la rupture (N/mm ²)	900	900
Limite élastique (N/mm ²)	700	700
Module d'élasticité (N/mm ²)	206000	206000
Coefficient de Poisson	0.30	0.3
Rugosité arithmétique moyenne Ra, flanc (µm)	2.4	2.4
Rugosité moyenne crête à crête Rz, flanc (µm)	16	16
Rugosité moyenne crête à crête Rz, pied (µm)	16	16

4.9.1.c. Lubrification

Type de lubrification : Lubrification à bain d'huile

Type d'huile : Huile: ISO-VG 100

Base de lubrifiant : Base d'huile minérale

Tableau 8 : Calcul de transmission

	Pignon	Roue
Rapport de transmission total [i_{tot}]	-6.000	
Rapport d'engrenage[u]	6.000	
Module apparent (mm) [mt]	5.563	
Angle de pression au cercle primitif de référence(°)[α_t]	22.046	
Angle de pression de fonctionnement (°)[α_{wt}]	22.346	
Angle de pression réel de fonctionnement (°)[α_{wn}]	20.270	
Angle d'hélice, cercle primitif de fonctionnement (°)[β_w]	26.048	
Angle d'hélice de base (°) [β_b]	24.326	
Entraxe zéro (mm) [ad]	798.292	
Somme des coefficients de déport [Sume xi]	0.3438	
	pignon	roue
Coefficient de déport[x]	0.2153	0.1285
Epaisseur de dent (arc) (en module) (en module) [sn^*]	1.7275	1.6643
Modification de saillie (mm) [k^*mn]	-0.011	-0.011
Diamètre de référence (mm) [d]	228.083	1368.500
Diamètre de base (mm)[db]	211.407	1268.442
Diamètre de tête (mm) [da]	240.215	1379.763
Ecart sur le cercle de tête (mm) [Ada.e/i]	0.000 /-0.010	
Diamètre de cercle de forme (mm) [dFa]	240.215	1379.763
Diamètre de tête actif (mm) [dNa]	240.215	1379.763
Diamètre de tête actif (mm) [dNa.e/i]	240.215 /240.205	
Diamètre primitif de fonctionnement (mm) [dw]	228.571	1371.429
Diamètre de pied (mm) [df]	217.737	1357.285
Coefficient de déport à la fabrication [xE.e/i]	0.1892/0.1755	0.0626/0.0351
Cercle de pied généré par xE (mm) [df.e/i]	217.476 /217.338	1356.626 /1356.351
Jeu en fond de dent théorique (mm) [c]	1.250	1.250
Jeu en fond effectif (mm) [c.e/i]	1.762 /1.540	1.494 /1.340
Diamètre de pied actif (mm) [dNf]	221.279	1361.334
Diamètre cercle de forme de pied (mm) [dFf]	221.088	1359.956
Reserve (dNf-dFf)/2 (mm) [cF.e/i]	0.285 / 0.166	1.179 / 0.967
Addendum (mm) [$ha=mn^*(haP^*+x)$]	6.066	5.632
Dedendum (mm) [$hf=mn^*(hfP^*-x)$]	5.173	5.607

Angle de roulement à dFa (°)[xsi_dFa.e/i]	30.913 /30.908	24.525 / 24.524
Angle de roulement à dNa (°)[xsi_dNa.e/i]	30.913 /30.908	24.525 / 24.524
Angle de roulement à dNf (°)[xsi_dNf.e/i]	17.777 /17.656	22.336 /22.316
Angle de roulement à dFf (°)[xsi_dFf.e/i]	17.348 /17.249	22.074 / 22.041
Hauteur de dent (mm) [H]	11.239	11.239
Nombre de dents virtuel[Zn]	54.939	329.636
Epaisseur de dent normale au cylindre de tête (mm) [san]	3.751	4.149
Intervalle apparent normale au cylindre de pied (mm) [efn]	3.775	3.386
Vitesse de glissement maximale à la tête (m/s) [vga]	14.932	11.844
Glissement spécifique à la tête[zetaa]	0.278	0.278
Glissement spécifique au pied[zetaf]	-0.385	-0.385
Glissement spécifique moyen[zetam]	0.278	
Coef. de glissement à la tête[Kga]	0.139	0.110
Coef. de glissement au pied[Kgf]	-0.110	-0.139
Pas transversal (mm) [pt]	17.477	
Pas de base (mm) [pbt]	16.199	
Pas de base réel (mm)[pet]	16.199	
Pas hélicoïdal (mm) [pz]	1469.135	8814.811
Pas axial (mm) [px]	35.833	
Longueur de conduite (mm) [ga, e/i]	24.352 (24.457 /24.224)	
Diamètre point de contact particulier B (mm)[d-B]	226.632(226.63 2/226.624)	1373.428(1373.348/ 1373.517)
Diamètre point de contact particulier D (mm)[d-D]	232.914(232.82 6/233.013)	1367.339(1367.3313 67.329)
Rapport de conduite de saille [eps]	0.838(0.839/ 0.837)	0.665(0.671/ 0.659)
Longueur minimale de la ligne de contact (mm) [Lmin]	429.368	
Rapport de conduite apparent [eps_a]	1.503	
Rapport de conduite apparent effectif [eps_a.e/m/i]	1.503/1.503 /1.495	
Rapport de recouvrement [eps_b]	7.396	
Rapport total de conduite [eps_g]	8.899	
Rapport total de conduite avec écarts [eps_g.e/m/i]	8.90.898 /8.891	

4.9.2. Facteurs d'influence généraux

Tableau 9 : Facteurs d'influence

	Pignon/roue
Force périphérique dans cercle primitif de référence (N)	72989.1
Force axiale (N) [Fa]	29557.2
Force radiale (N) [Fr]	86419.6
Force normale (N) [Fnorm]	
Force périphérique nominal cercle prim. de réf. par mm (N/mm) [w]	137.72

4.9.3. Forces dans le cercle de fonctionnement:

Tableau 10 : Forces dans le cercle de fonctionnement

Force périphérique nominal (N) [Ftw]	72833.3
Force axiale (N) [Faw]	0.0
Force radiale (N) [Frw]	29939.2
Vitesse circonférentielle cercle primitif (m/s) [v]	107.48
Vitesse circonférentielle cercle primitif de fonctionnement (m/s) [v(dw)]	107.71
Dépouille de rodage (μm) [yp]	2.9
Dépouille de rodage (μm) [yf]	2.4
Coefficient de correction[CM]	0.800
Facteur de corps de roue[CR, bs/b, sr/mn]	1.0 (0.760,49.729)
Facteur du profil de référence[CBS]	0.975
Coefficient de matériau[E/Est]	1.000
Rigidité dent individuelle (N/mm/ μm) [c']	14.321
Rigidité de l'engrènement (N/mm/ μm) [cg]	19.728
Masse réduite (kg/mm) [mRed]	0.18393
Vitesse de résonance (min-1) [nE1]	2412
Rapport de résonance (-)[N]	3.731
Zone sur critique	
Dépouille de rodage (μm) [ya]	2.9
Distance de palier 1 de l'arbre de pignon (mm)[l]	968.000
Distance s de l'arbre de pignon (mm) [s]	48.400
Diamètre extérieur de l'arbre de pignon (mm) [dsh]	207.300
Charge selon l'image 6.8, DIN 3990-1:1987[-]	4

Facteur K' selon l'image 6.8, DIN 3990-1:1987 [K']	-1.00
Sans effet d'appui	
Erreur de ligne de flanc (actif) (μm) [Fby]	2.87
de la déformation des arbres (μm) [fsh*B1]	6.14
Dent sans correction de ligne de flanc, Position de la portée : favorable	
de tolérances de fabrication (μm) [fma*B2]	11.00
Erreur de ligne de flanc, théorique (μm) [Fbx]	5.50
Dépouille de rodage (μm) [yb]	2.63
Facteur dynamique[KV]	1.368
Facteurs rép. longitudinale –flanc [KHb]	1.120
Pied de dent [KFb]	1.115
Grippage [KBb]	1.120
Facteurs de répartition transversale de la charge [Kha]	1.264
Pied de dent [KF _a]	1.264
Grippage [KB _a]	1.264
Facteur d'angle d'hélicegrippage [Kbg]	1.300
Nombre de cycles de charge (en mio.) [NL]	1800

4.9.4. Limite du pied

Calcul des facteurs de profil de dent selon méthode: C

Facteurs de profil calculés avec le déport de taillage **xE.e**

Tableau 11 : facteurs de profil de dent

	Roue 1	Roue 2
Facteur de profil de dent [Y_F]	2.25	2.19
Facteur de correction de contrainte [Y_S]	1.78	1.88
Angle de pression ($^\circ$) [α_{Fen}]	25.17	20.92
Bras de levier de pliage (mm) [h_F]	9.72	9.92
Epaisseur du pied de dent (mm) [S_{Fn}]	11.17	11.63
Rayon du pied de dent (mm) [ro_F]	2.31	2.04
Coefficient de recouvrement t [Y_{eps}]	0.664	0.664
Facteur d'angle d'hélice [Y_{bet}]	0.783	0.783
Largeur de dent déterminante (mm) [b_{eff}]	265.00	265.00
Contrainte nominale-pied de dent (N/mm^2) [σ_{F0}]	57.31	58.92
Contrainte en pied de dent (N/mm^2) [σ_F]	138.09	141.96

4.9.5 Contrainte de pied de dent admissible de la roue dentée d'essai

Tableau 12 : Contrainte de pied de dent

	Roue 1	Roue 2
Facteur d'appui [Y_{dreIT}]	0.998	1.006
Facteur de surface [Y_{ReIT}]	0.972	0.972
Effet de dimensions (pied de dent) [YX]	1.000	1.000
Coefficient de résistance à la fatigue limitée [YNT]	1.000	1.000
Facteur de flexions alternées [YM]	1.000	1.000
Charge au niveau du flanc gauche / droit (%):	100.0,00	100.0, 0.000
Facteur de correction de contrainte (N/mm ²)[Yst]	2	2
Contrainte en pied de dent admissible (N/mm ²)[sigFE]	560	560.00
Résistance limite-pied de dent (N/mm ²)[sigFG]	543.32	547.57
Sécurité prescrite [SFmin]	1.40	1.40
Facteur de sécurité pour contrainte de pied de dent	3.93	3.86
Puissance transmissible (kW) [kWRating]	22048.06	21613.76

4.9.6. Sécurité des flancs

Tableau 13 : Sécurité des flancs

	Roue1	Roue 2
Facteur de zone[ZH][ZE]	2.272	2.272
Facteur d'élasticité (N ^{.5} /mm)	189.812	189.812
Coefficient de recouvrement[Zeps]	0.816	0.816
Facteur d'inclinaison[Zbet]	0.948	0.948
Largeur de dent déterminante (mm) [beff]	265.00	265.00
Pression de contact nominale (N/mm ²)[sigH0]	279.83	279.83
Pression de contact au cercle primitif de fonctionnement (N/mm ²)[sigHw]	435.43	435.43
Facteur de contact unique[ZB,ZD]	1.00	1.00
Pression de flanc (N/mm ²)[σ_{HB} , σ_{HD}]	435.43	435.43
Facteur de lubrification (lors de NL) [ZL]	0.870	0.870
Facteur de vitesse (lors de NL) [ZV]	1.136	1.136
Facteur de rugosité (lors de NL) [ZR] [ZW]	0.863	0.863
Coefficient d'appariement des matériaux (lors de NL)	1.000	1.0000
Coefficient de résistance à la fatigue limitée [ZNT]	1.000	1.000
Aucun nombre admissible de piqûre (0=non, 1=oui) [ZL*ZV*ZR*ZNT]	0	0

Effet de dimensions (flanc) [ZX]	1.000	1.000
Pression de flanc admissible (N/mm ²)	571.87	571.87
Résistance limite-piqûres (N/mm ²)[δ_{HG}]	571.87	571.87
Sécurité prescrite [S]	1	1
Sécurité de pression de flanc au cercle primitif de fonctionnement [S_{Hw}]	1.31	1.31
Sécurité pression contact unique	1.31	1.31
(Sécurité portant sur le couple nominal) [(SHBD) ²]	1.72	1.72
Puissance transmissible (kW) [kWRating]	13531.88	13531.88

4.9.7. Résistance au grippage

Tableau 14 : Résistance au grippage

	Roue 1	Roue 2
Facteur de lubrification (par type de lubrification)[XS]	1.000	1.000
Facteur de structure relatif (grippage) [XWrelT]	1.000	1.000
Coefficient de contact thermique (N/mm/s ^{0.5} /K) [BM]	13.780	13.780
Dépouille de tête déterminante (μ m) [Ca]	8.90	8.90
Dépouille de tête optimale (μ m) [Ceff]	7.64	7.64
Largeur de dent déterminante (mm) [beff]	265.000	265.00
Force périphérique/largeur de dent déterminante (N/mm) [wBt]	433.488	433.488

4.9.8. Critère de la température éclair

Tableau 15 : Critère de la température éclair

	Système
Température de masse (°C) [theM-B]	83.07
theM-B = theoil + XS*0.47* flamax [theflamax]	27.81
Température de grippage (°C) [theS]	469.40
Coordonnée gamma (point culminant de la température) [Gamma]	0.125
Température de contact maximale. (°C) [theB]	110.88
Coefficient éclair ($^{\circ}K * N^{-.75} * s^{.5} * m^{-.5} * mm$) [XM]	50.058
Facteur géométrique[XB]	0.060
Facteur de répartition de la force[XGam]	1.000
Viscosité dynamique (mPa*s) [etaM]	8.52 (83.1 °C)
Coefficient de frottement [mym]	0.051
Sécurité prescrite[SBmin]	2.000
Facteur de sécurité contre grippage (temp. éclair)[SB]	9.767

4.9.10. Critère de température intégrale

Tableau 16 : Critère de température intégrale

	Système
Température de masse (°C) [theM-C]	80.63
$theM-C = theoil + XS \cdot 0.70 \cdot theflaint$ [theflaint]	15.18
Température intégrale de grippage (°C) [theSint]	469.40
Coefficient éclair ($^{\circ}K \cdot N^{-.75} \cdot s^{.5} \cdot m^{-.5} \cdot mm$) [XM]	50.058
Coefficient de recouvrement [Xeps]	0.260
Viscosité dynamique (mPa*s) [etaOil]	12.38 (70.0 °C)
Coefficient de frottement moyenné [mym]	0.048
Facteur géométrique [XBE]	0.140
Facteur d'engrènement [XQ]	1.000
Facteur de dépouille de tête [XCa]	1.059
Température intégrale de flanc (°C) [theint]	103.40
Sécurité prescrite [SSmin]	1.800
Facteur de sécurité contre grippage (temp. intég.) [SSint]	4.540
Sécurité pour moment transmis (temp. intég.) [SSL]	11.958

4.9.11. Tolérance des dentures : Selon ; DIN 3961:1978

Tableau 17 : Tolérance des dentures

	Roue 1	Roue 2
Qualité d'engrenage [Q-DIN3961]	6	6
Erreur de forme du profil (μm) [ff]	10.00	10.00
Erreur d'angle de profil (μm) [fHa]	7.00	7.00
Erreur totale de profil (μm) [Ff]	13.00	13.00
Erreur de la forme de ligne de flanc (μm) [fbf]	14.00	14.00
Erreur d'angle de ligne de flanc (μm) [fHb]	11.00	11.00
Erreur totale de ligne de flanc (μm) [Fb]	18.00	18.00
Erreur de pas réel (μm) [fpe]	9.00	12.00
Erreur individuel de pas (μm) [fp]	9.00	12.00
Saut de division (μm) [fu]	11.00	15.00
Erreur totale du pas (μm) [Fp]	35.00	50.00
Erreurs accumulées de pas circulaires sur $z/8$ (μm) [Fpz/8]	22.00	31.00
Faux-rond de rotation (μm) [Fr]	25.00	35.00
Etendue des erreurs de l'épaisseur (μm) [Rs]	15.00	20.00
Erreur composée tangentielle (μm) [Fi']	38.00	50.00
Saut tangentiel (μm) [fi']	15.00	17.00
Erreur composé radiale (μm) [Fi'']	28.00	39.00
Saut radial (μm) [fi'']	12.00	17.00

Tolérances de position axiale (recommandation selon ISO/TR 10064:1992, qualité6)

Valeur maximale pour erreur de déviation des axes (μm)[fSigbet] 49.31 ($F_b=27.00$)

Valeur maximale pour inclinaison des axes (μm) [fSigdel 98.63

4.9.12. Données complémentaires

Tableau 18 : Données complémentaires

	Pignon	Système	Roue
Rigidité à la torsion (MNm/rad) [cr]	116.8		4205.6
Coefficient de frottement moyen (selon Niemann)[mum]	0.032		
Glissement d'usure selon Niemann[zetw]		0.418	
Puissance dissipée par frottement des dents (kW)[PVZ]	15.625		
(Rendement de l'engrenage (%)[etaz]		(99.801)	
Poids - calculé avec d_a (kg)[Mass]	214.687		6868.681
Poids total (kg)[Mass]		7083.368	
Moment d'inertie (système par rapport à la pignon): Calcul sans tenir compte de la forme exacte de la dent			
roues individuelles $((d_a+df)/2\dots d_i)$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)[TraeghMom]	1.27469		1627.82172
System $((d_a+df)/2\dots d_i)$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)[TraeghMom]		46.49196	

4.10. Détermination de la forme de la dent :

Données pour calcul de forme de dent:

4.10.1. Calcul du pignon

Profil de dent, Roue 1, Pas 1: Automatiquement (finissage)

$haP^*= 1.030$, $hfP^*= 1.250$, $rofP^*= 0.380$

4.10.2. Calcul de la roue

Profil de dent, Roue 2, Pas 1: Automatiquement (finissage)

$haP^*= 1.077$, $hfP^*= 1.250$, $rofP^*= 0.380$

❖ Remarque :

- Les valeurs avec [.e/i] signifient: Valeur maximale [e] et minimale [i] en tenant compte des tolérances
- Indications avec [.m] signifient : valeur moyenne dans la tolérance

- Pour le jeu, les tolérances d'entraxe et les épaisseurs de dent sont prises en compte. Les jeux minimum et maximum correspondant au plus petit, respectivement au plus grand des écarts sont indiqués. Le calcul est effectué pour le cercle primitif de fonctionnement.
- Détails de la méthode de calcul:

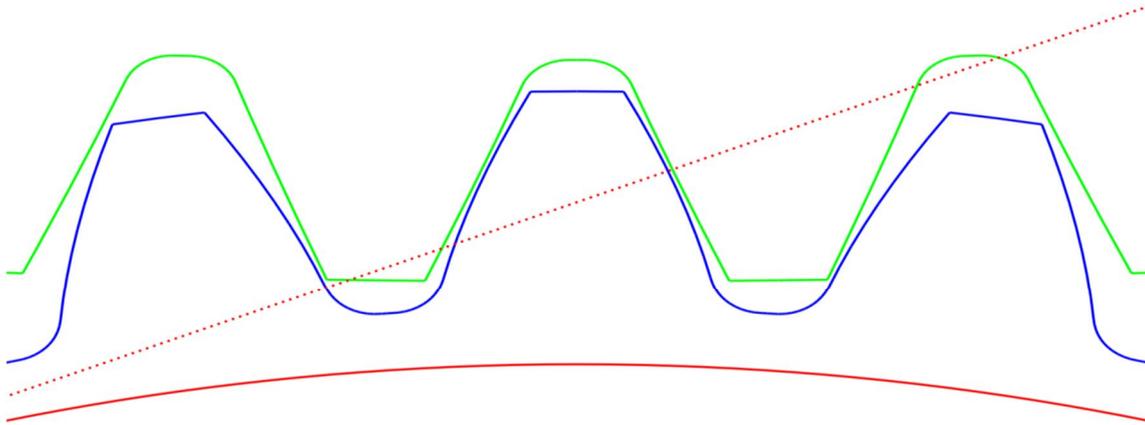


Figure 35 : Engrenement pignon /Roue

Fig. 4.13.

$$\begin{aligned}
 da1 &= 240.2097 \text{ mm}, df1 = 217.4070 \text{ mm}, As1 = -0.1200 \text{ mm} \\
 da2 &= 1379.7584 \text{ mm}, df2 = 1356.4887 \text{ mm}, As2 = -0.2900 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

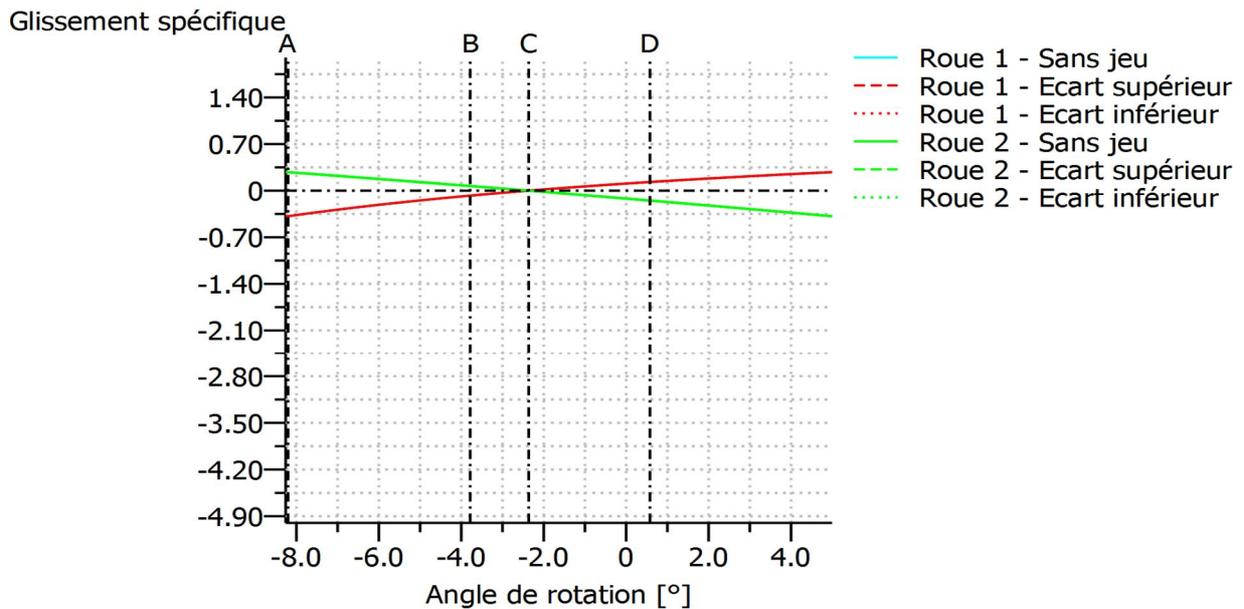


Figure 36 : Glissement spécifique pignon/Roue

On peut remarquer que le glissement spécifique maximal est (0.38 mm) au point de la fin de contact comme montré sur la figure. 36 . Ce qui explique la zone la plus dangereuse au niveau de contact pignon roue dentée.

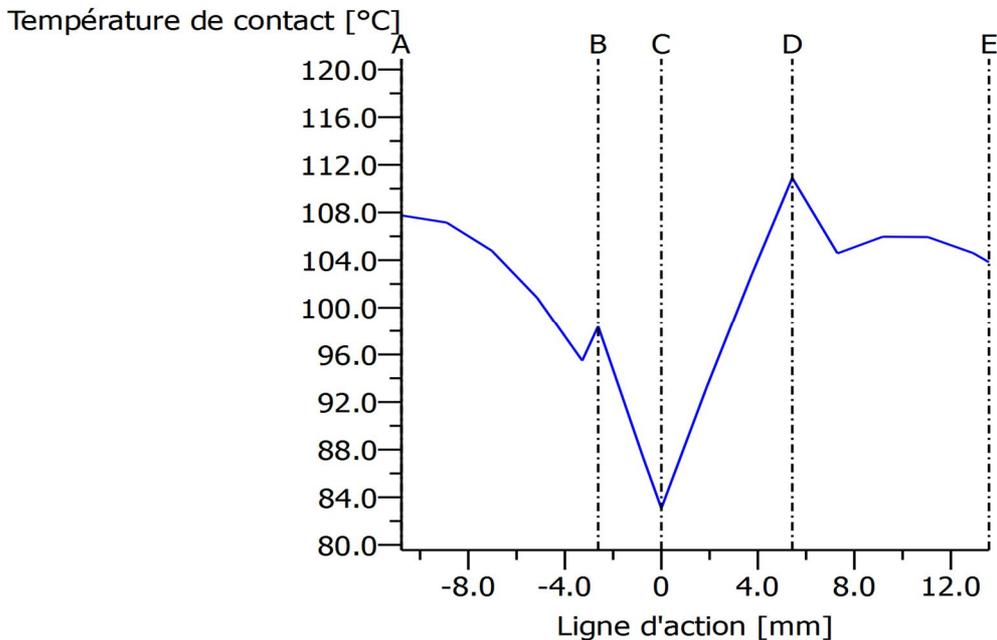


Figure 37: Température de contact pignon/Roue

On peut remarquer que la température de contact minimale est en milieu de flanc de dent au point C comme montré dans la figure. 37 ce qui explique la zone la plus faible de frottement et le contact dans ce cas est reparti sur un minimum de dent ce qui traduit un faible glissement.

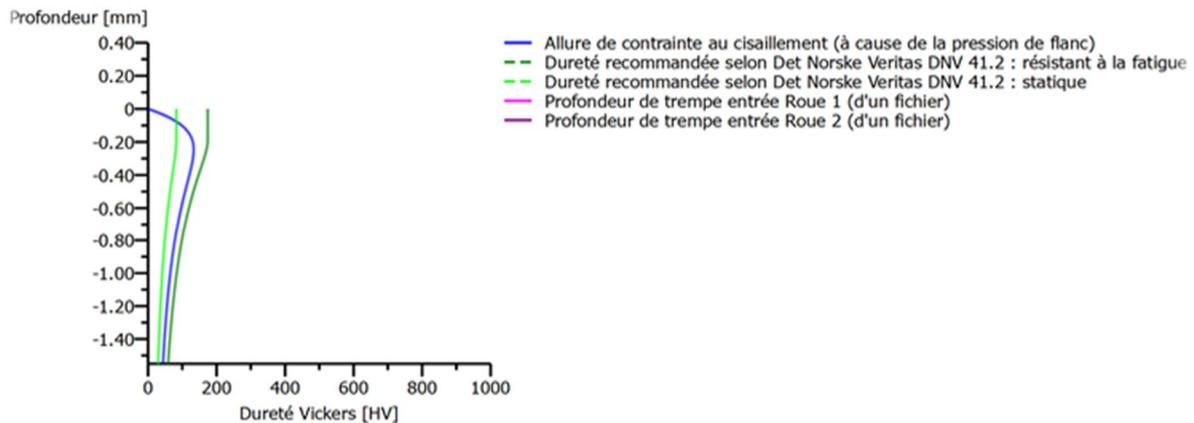


Figure 38 : Profondeur de trempe pignon/roue

il est conseillé par les constructeurs qu'on doit avoir une profondeur de traitement thermique au minimum trois fois plus grande par rapport à la profondeur de cisaillement au flanc de dent ; pour cela, nous avons abordé les calculs de profondeur de trempe pour protéger nos engrenages contre la fatigue par contact.

-Profondeur de la contrainte maximale au cisaillement 0.247 mm

-Contrainte de cisaillement augmentée de 1.63

-Facteur de sécurité pour le calcul des profondeurs de trempe recommandées selon DNV 41.2
1.00

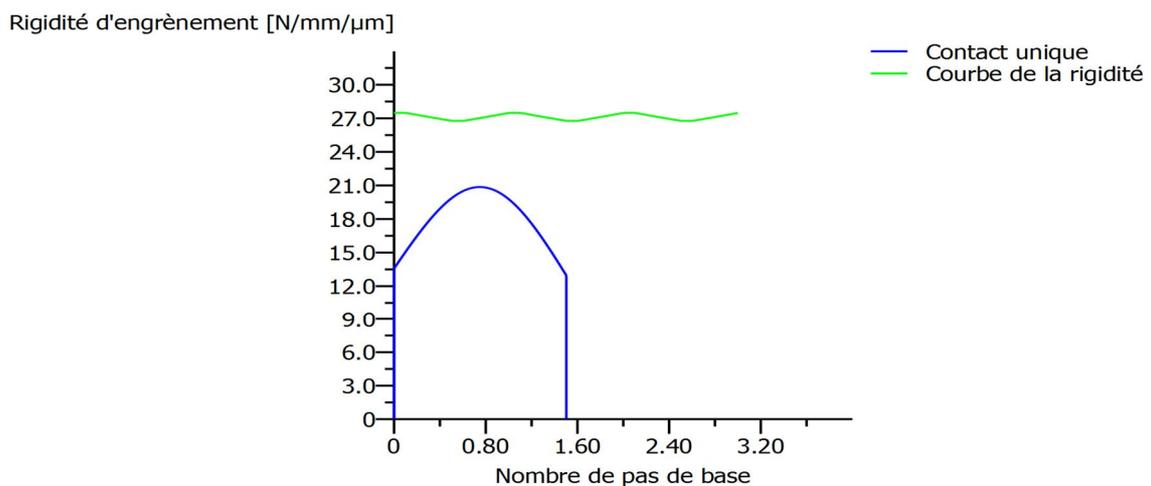


Figure 39 : Rigidité de l'engrènement théorique pignon/roue

Cette courbe montre la rigidité de l'engrènement dans le cas de contact unique : la courbe en bleu figure 4.18. et celle de contact total i.e la courbe qui tient compte le nombre total des dents en contact.

Rigidité d'engrènement calculée à base du profil de la dent

Rigidité d'engrènement [N/mm/μm]: mean= 27.12, σ= 0.25, min= 26.77, max= 27.49

As=-0.1200/-0.2900 da=240.215/1379.763 a=800.000, eps.a=1.503

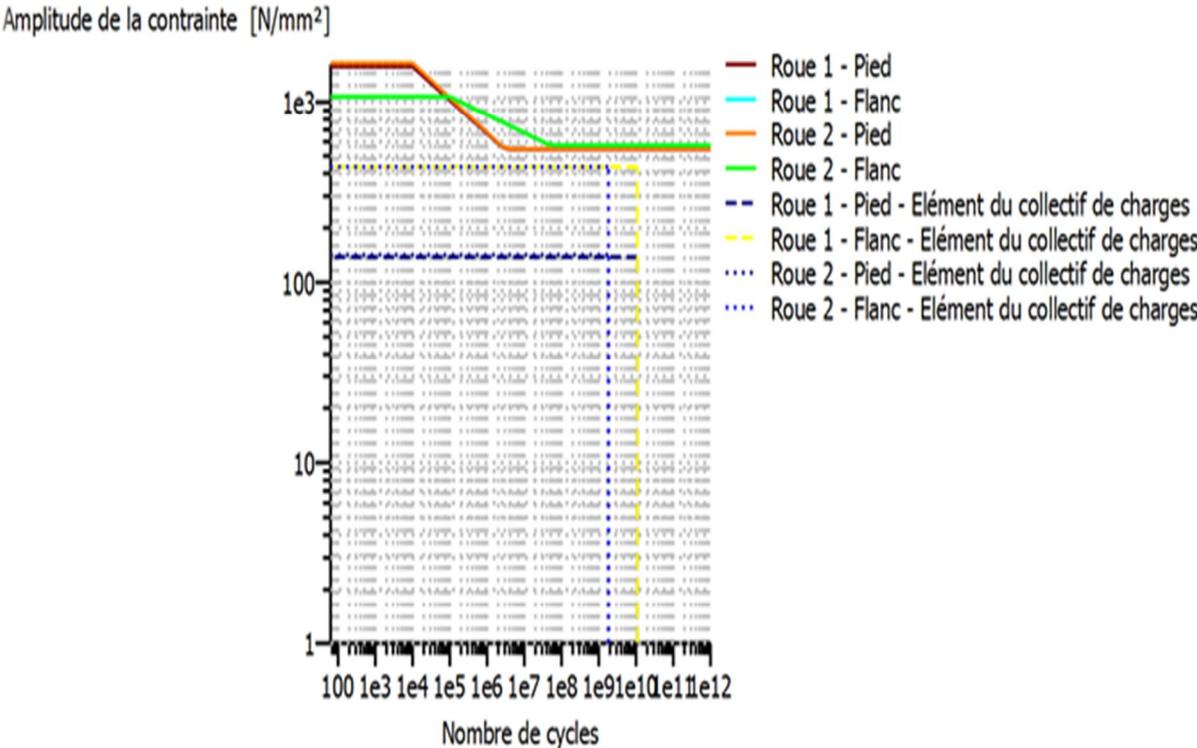


Figure 40 : Courbes de Woehler

Cette courbe montre la durée de vie théorique de notre structure après notre proposition de changer quelques grandeurs géométriques et les coefficients proposés pour le profil de flanc de dent. On peut remarquer que cette dernière est augmentée jusqu'à une valeur max donnée par la norme de calculs.

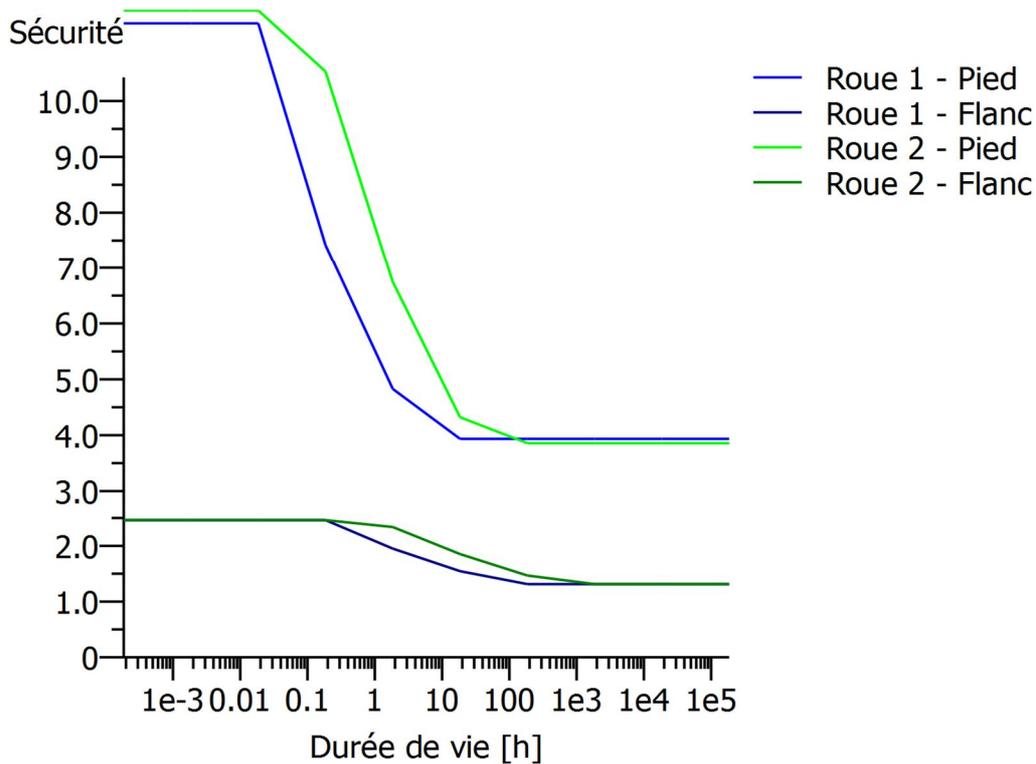


Figure 41 : Courbes des coefficients de sécurité

Pour les deux roues et pour le pied et le flanc, des coefficients de sécurité sont proposés. Cette marge de sécurité va protéger à une certaine limite la structure contre la propagation de plusieurs phénomènes tels que la fissure.

Viscosité cinématique [mm²/s]

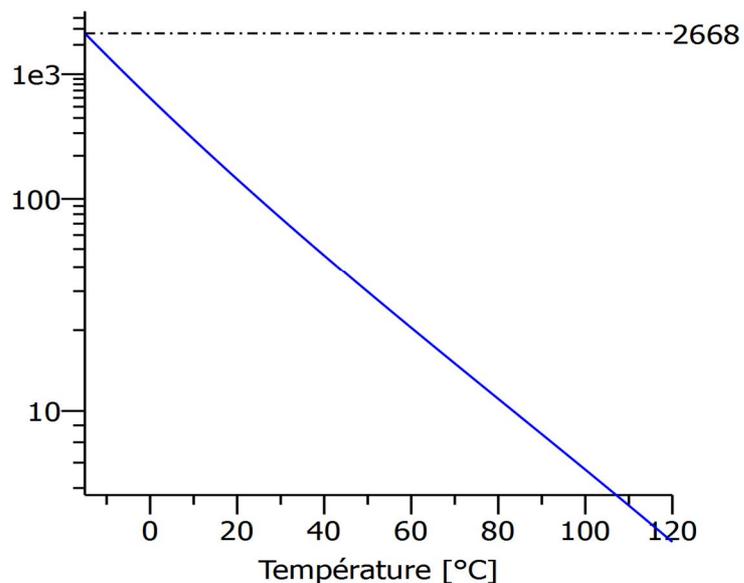


Figure 42 : Viscosité de l'huile

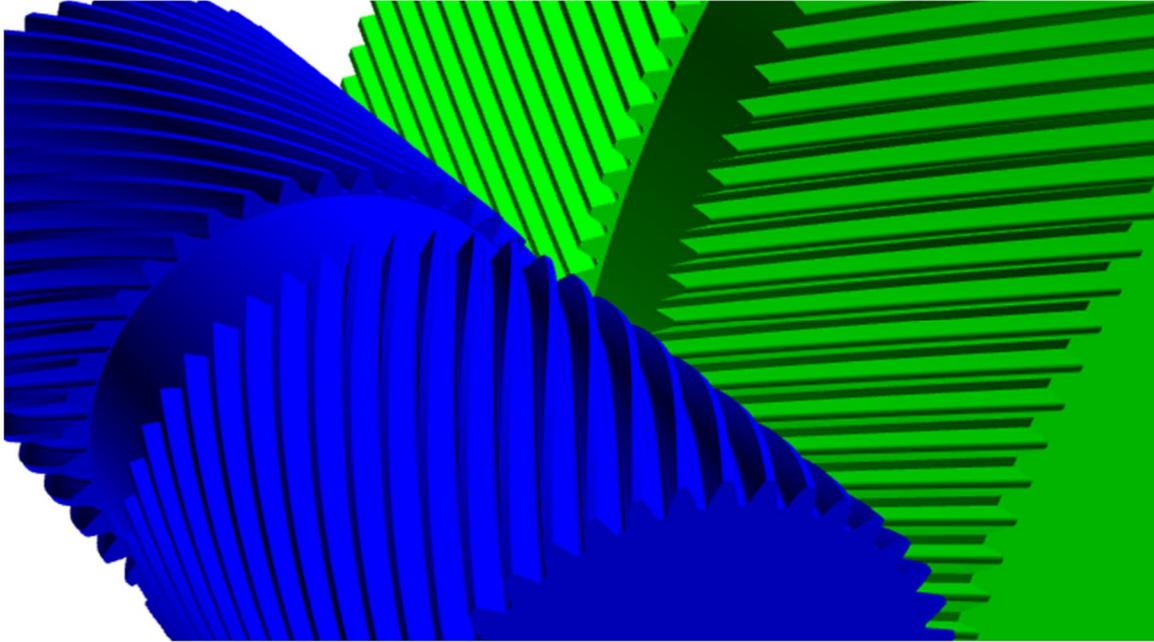


Figure 43 : *Système*

da1 = 240.2097 mm, df1 = 217.4070 mm, As1 = -0.1200 mm
da2 = 1379.7584 mm, df2 = 1356.4887 mm, As2 = -0.2900 mm

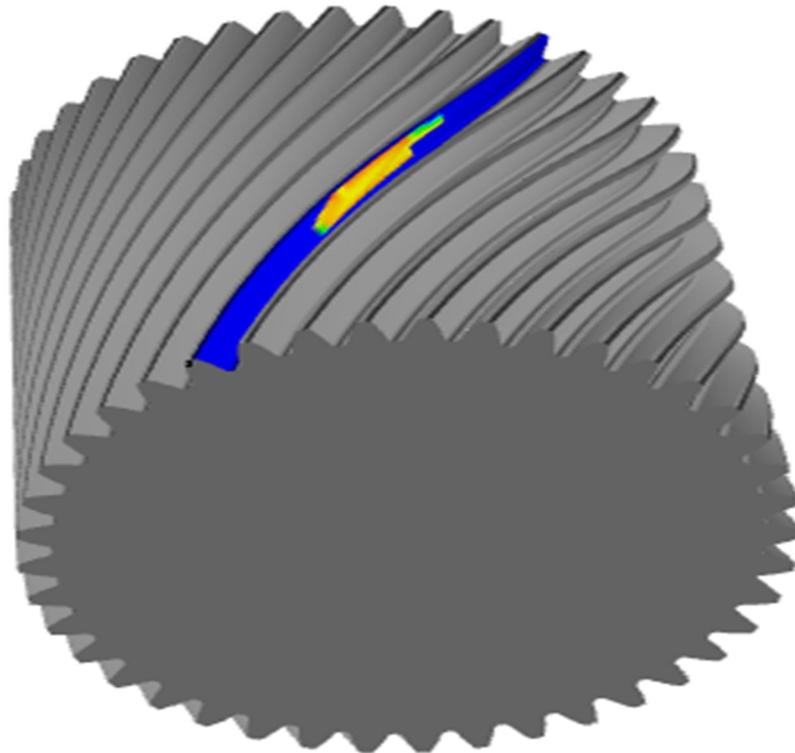


Figure 44: *Profil de dent pignon*

da1 = 240.2097 mm, df1 = 217.4070 mm, As1 = -0.1200 mm

5. Chapitre 5 Application de la méthode de MBF à un groupe turbo-alternateur

Nous développons dans ce qui suit les étapes d'une MBF qui vont être appliquées au système choisi pour notre étude.

5.1 Etape 1 : découpage du procédé d'un bien :

5.1.1. Objectifs :

Les objectifs de cette étape incluent la définition et la liste des systèmes qui composent le procédé ou le bien. Les résultats de cette étape consistent à faire un inventaire exhaustif de tous les systèmes, qu'ils soient retenus ou non ultérieurement pour faire l'objet d'une politique de maintenance préventive.

5.1.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape :

Les documents à rassembler pour cette étude concernent principalement ceux relatifs à la description fonctionnelle du procédé ou du bien parmi la documentation rassemblée lors de la tâche 01, on consultera en priorité :

- Les dossiers de conception détaillant la mission, les phases de la mission, les fonctions principales nécessaires pour accomplir les différentes phases du procédé ou du bien,
- Les schémas et les blocs fonctionnels décrivant le fonctionnement
- Les modes de fonctionnement normaux et anormaux
- Les dossiers fournis par les constructeurs
- Les manuels de fonctions de fonctions de personnels

5.1.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :

La finalité MBF étant de rechercher les matériels des systèmes qui induiront une perte des fonctions principales du procédé ou de bien, il est naturel de s'orienter vers les méthodes de décomposition.

5.1.4. Documents à produire à la fin de l'étape :

Après la décomposition fonctionnelle la plus adaptée un procédé ou au bien, les synthèses de ces travaux pourront être classées et archivées dans un ensemble de documents comprenant la

liste exhaustive des systèmes et un dossier fonctionnel pour chaque système comme le montre la figure. Même si tous ces systèmes ne seront pas retenus lors de la mise au point du programme initial, il n'est pas exclu, suite aux analyses du retour d'expérience, que certains d'entre eux doivent être considéré comme éligibles pour un programme **MBF**.

5.2 Etap2 : sélection des systèmes :

5.2.1. Objectifs :

Une fois établie la liste complète, il convient de sélectionner les systèmes à retenir pour leur analyse. Dans cet objectif, il est indispensable que l'entreprise ait défini de façon explicite les critères permettant de retenir ou de rejeter tel ou tel système. Pour conserver une traçabilité des choix, les analystes devront expliciter les raisons objectives ou subjectives de leurs choix dans les dossiers.

5.2.2. Documents nécessaire pour la réalisation de l'étape

Le principe général de la sélection des systèmes repose sur les effets des défaillances de leurs fonctions dans la réalisation de la fonction principale du procédé du bien. Il est donc impératif de rassembler tous les éléments permettant aux analystes d'évaluer l'importance et la fréquence d'occurrence de la perte de ces fonctions.

5.2.2. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :

Les méthodes utilisables pour la sélection des systèmes sont basées sur des approches qualitatives ou quantitatives en fonction de la disponibilité du retour d'expérience et des compétences internes aux outils de la sûreté de fonctionnement.

5.2.3. Documents à produire à la fin de l'étape

Un rapport doit être rédigé pour fournir la liste des systèmes, la ou les méthodes retenus pour la sélection et les justifications de l'élément de certains systèmes.

5.3 Etap3 : Identification des limites du système et sous-systèmes :

5.3.1. Objectifs :

Pour la limitation de l'étude de notre projet, un classement basé sur la criticité des éléments qui sont analysés sera réalisé et seuls les éléments les plus critiques seront conservés la suite de l'étude.

En particulier, une approche simplifiée de méthode AMDEC pour les défaillances fonctionnelles est utilisée pour chaque moyen de production.

5.3.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape

Les documents sont :

Les dossiers de conception détaillant les missions, les phases de la mission, les fonctions principales nécessaires pour accomplir les différentes phases de la mission du système,

- les schémas et bloc fonctionnels décrivant le fonctionnement,
- les modes de fonctionnement normaux et anormaux,
- les descriptions des matériels et des composants des systèmes et sous-systèmes,
- les gammes de maintenance d'entretien utilisé,
- tout autre document spécifique.

5.3.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape

Dans certains cas, les systèmes qui ont été sélectionnés son d'une complexité telle qu'il devient indispensable de faire appel à des sous-systèmes interconnectés, regroupant un nombre plus réduit de matériels en générale homogènes , mais assurant des fonctions spécifiques, cela permet aux analystes de concentrer leur efforts sur partie du système sans être influences par les fonctions des autres parties du systèmes.

La décomposition en sous-systèmes peut être faite avec les techniques d'analyse fonctionnelle, on se reporte aux plants et schémas des matériels pour identifier les matériels qui participent à leur réalisation. A l'aide de ces schémas, on doit identifier clairement les limites du système ou circuits serveurs (électricité, air comprimé, eau, Etc.).

5.3.4. Documents à produire à la fin de l'étape :

Les limites du système ou de ses sous-systèmes doivent être répertoriées dans un dossier spécifique contenant les plans, les schémas et la liste des matériels retenus. Les matériels sont retenus doivent être inventoriés avec les justificatifs de leur non-pri en compte.

5.4 Etape 4 : Identification des défaillances fonctionnelles :

5.4.1. Objectifs

Nous connaissons que le système fonctionnelle peut perde ses capacités d'accomplir ses

fonctions suivant plusieurs modes de défaillance, Il est donc indispensable de dresser l'inventaire des fonctions d'un système et de ses sous-systèmes et de connaître ses défaillances fonctionnelles.

5.4.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape:

Pour faire ces inventaires, les documents suivants sont utiles :

- dossier de conception détaillant les missions, les phases de la mission, les fonctions principales nécessaires pour accomplir les différentes phases de la mission du système,
- les schémas et les blocs fonctionnels décrivant le fonctionnement,
- les modes de fonctionnement normaux et anormaux,
- les conditions d'environnement
- les descriptions des matériels et des composants des systèmes et sous- systèmes,
- les défaillances envisagées sur les systèmes et ses composants,
- les modes de conduite et les procédures d'exploitation,
- les procédures d'urgence en cas d'incidents graves.
- les dossiers de formation à la conduite,
- les dossiers de fonctionnement du simulateur de conduite,

5.4.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :

Les tâches préalables à l'identification des défaillances fonctionnelles sont la recherche et la formulation précise des fonctions des systèmes et des sous-systèmes pour chaque phase de la mission du procédé ou du bien. En effet, la maintenance basée sur la fiabilité doit être capable d'éviter les défaillances

5.4.4. Document à produire à la fin de l'étape :

Liste des défaillances.

5.5 Etape 5. Hiérarchisation de la criticité de défaillance :

5.5.1 Objectifs

Les défaillances fonctionnelles entraînent la perte des fonctions du système avec fréquences ou des probabilités différentes d'occurrence. Il est donc important, en exploitant le retour d'expérience sur le système ou des systèmes identiques, de les hiérarchiser en fonction de leurs fréquences. Ensuite, il est indispensable pour chaque défaillance fonctionnelle de définir

l'importance de chacun des modes de défaillances et de déterminer le matériel du système qui en est à l'origine. Pour l'exhaustivité des analyses, cette opération doit être entreprise pour chaque phase de la mission.

5.5.2. Documents nécessaire pour la réalisation de l'étape :

- ✚ les dossiers de conception détaillant les missions, les phases de la mission, les fonctions principales nécessaires pour accomplir les différentes phases de la mission du système,
 - ✚ les schémas et bloc fonctionnels décrivant le fonctionnement.
 - ✚ les modes de fonctionnement normaux et anormaux.
 - ✚ les conditions d'environnement,
 - ✚ les descriptions des matériels et des composants des systèmes et sous -systèmes
 - ✚ les défaillances déjà rencontrées sur les systèmes et ses composants,
 - ✚ les modes de conduite et les procédures d'exploitation,
 - ✚ les procédures d'urgence en cas d'incidents graves,
 - ✚ les objectifs visés de disponibilité, maintenabilité et de sûreté
 - ✚ les contraintes réglementaires (environnement, bruit, inspections, etc.),
- données de retour d'expériences.

5.5.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :

Les étapes précédentes avaient pour but de rechercher les défaillances des fonctions de système,

Dans le but de déterminer les matériels critiques à l'intérieur des limites du système recensés à l'étape 3, il est indispensable d'établir les liens entre les défaillances et leurs causes. Pour les établir, les modèles de décomposition fonctionnelle, au niveau interne du système, doivent être élaborés en utilisant l'une des méthodes d'analyses fonctionnelles.

Il n'est pas nécessaire d'inclure des niveaux de décomposition inférieure à ceux correspondent aux matériels.

La hiérarchisation de l'occurrence des modes se détermine à partir de l'exploitation du retour d'expérience en estimant les fréquences par des approches statistiques fréquentielles.

Pour déterminer l'importance des conséquences des modes de défaillance, la méthode la plus appropriée est une analyse de modes de défaillance et de leurs effets (AMDE).

Pour chaque défaillance fonctionnelle, il faut exploiter le retour d'expérience pour faire l'inventaire des modes de défaillance. Dans ces études, il faut veiller à ne retenir que des modes de défaillance fonctionnelle. Pour rendre plus aisée la recherche de ces modes de défaillance fonctionnelle, différents organismes spécialisés dans la production de bases de données de retour d'expérience présentent des listes préétablies de modes de défaillances.

Pour les objectifs spécifiques à la maintenance basée sur la fiabilité, on doit trouver obligatoirement des renseignements sur les matériels responsables de la défaillance, sa gravité et l'évidence de la défaillance. Ces informations sont en effet indispensables pour conduire les étapes suivantes. Les critères de gravité dépendent d'une part des objectifs propres de chaque entreprise et d'autre part des contraintes réglementaires édictées par les législateurs (environnement, sécurité des personnels, etc.). La caractérisation de l'évidence de la défaillance doit faire appel aux compétences des personnels de la conduite travaillant normalement dans la salle de commande et de celles des rentiers. Dans le cas où il existe des défaillances de mode commun, les AMDE ne sont valables et il sera nécessaire d'utiliser des outils tels que les arbres de défaillance.

5.5.4. Documents à produire à la fin de l'étape :

Plusieurs dossiers doivent être constitués à la fin de cette étape :

- Descriptif des modèles de décomposition fonctionnelle interne du système,
- Evaluation des fréquences d'occurrences de défaillances du système,
- Etude complète associée aux AMDE.

5.6 ETAPE 6 : Identification des matériels critiques et des causes

5.6.1. Objectif

Les tâches de maintenance préventive sélectionnées dans le cadre de la maintenance basée sur la fiabilité ne concernent que les composants des matériels critiques

Le premier objectif est d'identifier les matériels critiques d'un système pour toutes les phases de sa mission. Le second objectif est d'identifier les causes et les mécanismes de dégradation qui affectent les différents composants des matériels critiques de façon à pouvoir identifier ultérieurement le contenu et la nature des tâches de maintenance préventive.

5.6.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape :

- ❖ Les dossiers de l'étape 5.
- ❖ Les description des matériels et des composants des systèmes et sous-systèmes,
- ❖ Les défaillances rencontrées sur les systèmes et ses composants,
- ❖ Les modes de conduite et les procédures d'exploitation,
- ❖ Les informations de fiabilité sue les composants de l'installation,
- ❖ Toute autre information spécifique.

5.6.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :

- ❖ **La premier** tâche découle directement de la précédente et consiste à rechercher, dans l'ensemble des informations contenues dans le dossier de l'étape 5 , les matériels qui ont été considérés au moins une fois critique dans la missions et les fonctions du système. Les matériels non critique ne feront pas l'objet d'une maintenance préventive mais il est souhaitable de comptabilise leurs taux de défaillance pour vérifier s'ils n'induisent pas des couts trop élevés.
- ❖ **La seconde** tâche consiste pour chaque matériel critique à rechercher une méthode de décomposition fonctionnelle ou matérielle la plus adaptée pour identifier les causes et les mécanismes les dégradations affectant les composants.
- ❖ **La troisième** tâche dédiée à la réalisation des AMDEC suivant les procédures, en exploitant le retour d'expériences pour déduire des paramètres tels que la fréquence F, la gravité G, et la détectabilité D. des informations spécifiques à la maintenance basée sur la fiabilité doivent figurer dans les tableaux d'AMDEC. Elles concernent notamment la classification de la cause de la défaillance en fonction de ses conséquences pour les stratégies de maintenance à retenir ultérieurement. Une cause peut être significative et il faudra alors lui définir obligatoirement une tache de maintenance préventive. Par contre si elle est classée comme négligeable, on pourra retenir une option de maintenance corrective. Il appartient à l'utilisateur de définir sa propre échelle de criticité des défaillances pour aider les analystes de maintenance dans la sélection des taches de maintenance.

5.6.4. Document à produire à la fin l'étape

Les résultats de cette étude sont les dossiers complets d'AMDEC des matériels critiques qui doivent obligatoirement définir tous les critères et les justifications des choix retenus, la liste complète des matériels critiques.

5.7 ETAPE 7. Sélections des tâches de maintenance et de leur périodicité

5.7.1. Objectifs

Cette étape représente l'une des plus importantes dans l'établissement d'un programme de maintenance basée sur la fiabilité car elle conduit d'une part aux choix des tâches de maintenance et de leurs périodicités. Elle concerne les modes de défaillance des composants des matériels recensés à la fin de l'étape 6

5.7.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape :

Ce sont :

- ❖ Les défaillances rencontrées et ses composants,
- ❖ Les procédures d'urgence en cas d'incidents graves,
- ❖ Les contraintes réglementaires (environnement, bruits, inspection, etc..)
- ❖ Les politiques de maintenance retenus (sous-traitant, interne, etc...,)
- ❖ Les niveaux de maintenance retenus pour le site de l'installation,
- ❖ Les informations de la fiabilité sur les composants de l'installation,
- ❖ Les programmes de maintenance actuellement utilisée,
- ❖ Les gammes de maintenance et d'entretien,
- ❖ Les outils et les matériels utilisés pour la maintenance conditionnelle,
- ❖ Les autres informations spécifiques.

5.7.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape

Pour la sélection des tâches de maintenance, la pratique de la maintenance basée sur la fiabilité montre qu'il est nécessaire de définir un arbre logique de décision pour évaluer pas à pas les méthodes candidats en fonction de critères tels que les impacts sur les objectifs retenus et l'évidence de la défaillance.

Les industries autres que celles du secteur aéronautique ont adapté les logiques de décision de la MSG-3 en fonction leurs préoccupations propres. Dans la majorité des cas, l'arbre logique de sélection considère de façon séquentielle dans un ordre qui varie d'une application à une autre, les tâches suivantes :

- ❖ Graissage
- ❖ Petit entretien
- ❖ Contrôle de fonctionnement pour la recherche de défaillances cachées
- ❖ Inspection
- ❖ Contrôle
- ❖ Assai
- ❖ Epreuve
- ❖ Remplacement systématique

Les critères importants pour sélectionner une tâche avec cet arbre de décision concernent sont applicabilité et son efficacité. La maintenance basée sur la fiabilité ne retient que cette catégorie de tâche

5.7.4. Document à produire à la fin de l'étape

Les informations élaborées pendant cette étape doivent être rassemblées dans un dossier qui doit décrire pour chaque cause induisant un mode de défaillance de la fonction du système, le composant du matériel en cause, la tâche de la maintenance retenue dans l'intervalle entre les interventions.

5.8 Etape 8. Rédaction des procédures de maintenance et implantation

5.8.1. Objectif :

Réaliser une opération de maintenance préventive n'a pas sauf cas particulier, beaucoup de sens si elle ne concerne qu'un seul composant d'un matériel critique. C'est la raison pour laquelle il convient de regrouper les tâches élémentaires de maintenance au sein de procédures ou gammes d'entretien en vue de leur implantation pratique. Comme la maintenance basée sur la fiabilité peut faire appel à des techniques et des technologies nouvelles, une implantation effective va nécessiter leur acquisition et la mise en place de formation des personnels de maintenance. Une fois l'implantation des programmes de maintenance est terminée, il est indispensable de définir les modalités de collecte des données de retour expériences observées

pendant les activités de maintenance corrective ou préventive. Cette opération correspond aux objectifs de l'étape 8

5.8.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape

Ce sont :

- ❖ Le mode de fonctionnement normal et anormal,
- ❖ Les conditions d'environnement,
- ❖ Les descriptions des matériels et des composants des systèmes et sous-systèmes,
- ❖ Les défaillances envisagées sur le système et ses composants,
- ❖ Les modes de conduite et les procédures d'exploitation,
- ❖ les objectifs visés de disponibilité, de maintenabilité, et de sûreté
- ❖ les politiques de maintenance retenus pour site de l'installation,
- ❖ les dossiers fournis par les constructeurs,
- ❖ les compétences prévues des personnels d'exploitation et de maintenance,
- ❖ les cahiers de charges de la formation en maintenance,
- ❖ le dossier de l'étape 7

5.8.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape :

Il s'agit principalement d'organiser de façon structurée et rationnelle les contenus des procédures et des gammes d'entretien pour qu'ils soient utilisables par les personnels, les procédures existantes pourront être utilisées après modifications et révisions. Par contre, pour des procès ou des biens nouveaux, les procédures de maintenance pourront être rédigées en prenant comme fil directeur la démarche de maintenance basée sur la fiabilité et en insistant sur les conséquences fonctionnelles des défaillances des composants des matériels spécifiques et de technologies nouvelles, ils devront faire l'objet d'acquisitions et les personnels devront être formés à leur mise en œuvre. L'originalité de la maintenance basée sur la fiabilité réside dans l'exploitation du retour d'expérience, les modalités de la collecte de retour d'expérience doivent être définies en respectant les recommandations émises dans ce chapitre pour les tâches (3 ; 4) afin de conserver une cohérence.

Comme les personnels de maintenance réalisant les actes pratiques sur les matériels jugent très souvent cette collecte une tâche de personnel, il faut insister dans le cahier des charges de la collecte sur le fait de consigner toutes les données, même si un effet, pour évaluer

l'efficacité de la maintenance MBF, il est aussi important de noter que le matériel est en bon état après une visite, que relever les causes de défaillance et de dégradation lors d'une maintenance corrective ou une remise en état

5.8.4. Documents à produire à la fin de l'étape

- le cahier des charges de la collecte des données du retour d'expérience
- l'ensemble de procédures et gammes d'entretien
- les contenus des programmes de formation aux outils de maintenance conditionnelle
- la formation des personnels à la collecte des données

5.9. Etape 9 : Définition des indicateurs de maintenance

5.9.1. Objectifs

Après la mise en place de maintenance basée sur la fiabilité, il est indispensable de vérifier si les efforts consacrés à son développement ont apporté des gains sensibles à l'entreprise. Les indicateurs de maintenance représentent des solutions possibles pour quantifier l'apport de la maintenance basée sur la fiabilité.

Cette étape a pour objectifs de définir des indicateurs de maintenance

5.9.2. Documents nécessaires pour la réalisation de l'étape

Ce sont :

- ❖ les objectifs visés de disponibilité, maintenabilité, de sûreté et de qualité,
- ❖ les défaillances rencontrées sur le système et ses composants,
- ❖ les niveaux de maintenance retenus pour le site de l'installation,
- ❖ les informations de la fiabilité sur les composants de l'installation,
- ❖ les outils et les compétences disponibles pour la réalisation d'études liées à la FMD (fiabilité, maintenabilité, disponibilité),
- ❖ les gammes de maintenance et l'entretien.

5.9.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape

On peut distinguer deux grandes familles d'indicateurs utilisables pour mesurer l'impact de la maintenance : la 1^{ère} famille repose sur des conséquences directes et techniques de la maintenance tandis que la seconde famille s'intéresse plus à l'impact de la maintenance sur

les objectifs stratégiques de l'entreprise. Le calcul de ces indicateurs pour qu'ils soient fiables exigent l'utilisation des données précises de retour d'expérience sur les temps passés par les personnels, les durées d'immobilisation les couts des pertes de production et de fabrication .

Certains secteurs industriels se sont dotés au plan international d'indicateurs, de façon à pouvoir comparer leurs performances respectives.

Dans les autres secteurs industriels, les indicateurs techniques et économiques utilisés dans le cadre des audits de maintenance peuvent être retenus. La liste suivante, non exhaustive, répond une partie de ces indicateurs techniques et économique :

- nombre de tâches de maintenance corrective et préventive,
- temps annuel des arrêts forcés dus aux défaillances techniques,
- cout de frais directs de maintenance corrective et préventive,
- paramètre liés aux performances de la maintenance des matériels (MTBF, MTTR, etc.),
- couts des pertes de production directement imputables à la maintenance,
- couts des pièces de rechange,
- Etc.

Les indicateurs généraux tels que la disponibilité ou la cadence de production posent des difficultés d'interprétation pour établir une relation précise de cause à effet dû à l'implantation d'une nouvelle politique de maintenance.

5.9.4. Documents à la fin de l'étape

Le document à produire en fin de cette étape doit présenter les définitions précises des indicateurs et leurs modalités pratiques de calcul.

5.10 Etape 10 : Evolution du programme de maintenance

5.10.1. Objectifs :

La maintenance est une activité qui se réalise pendant tout la durée de vie du procédé. Elle est amenée à évaluer en fonction du vieillissement de matériels, des nouveaux modes de fonctionnement, des modifications de parties de l'installation, de nouvelles contraintes réglementaires, de la mise au point des méthodes de maintenance conditionnelle plus efficaces ou plus économique et des modifications des organisations et des objectifs stratégiques des

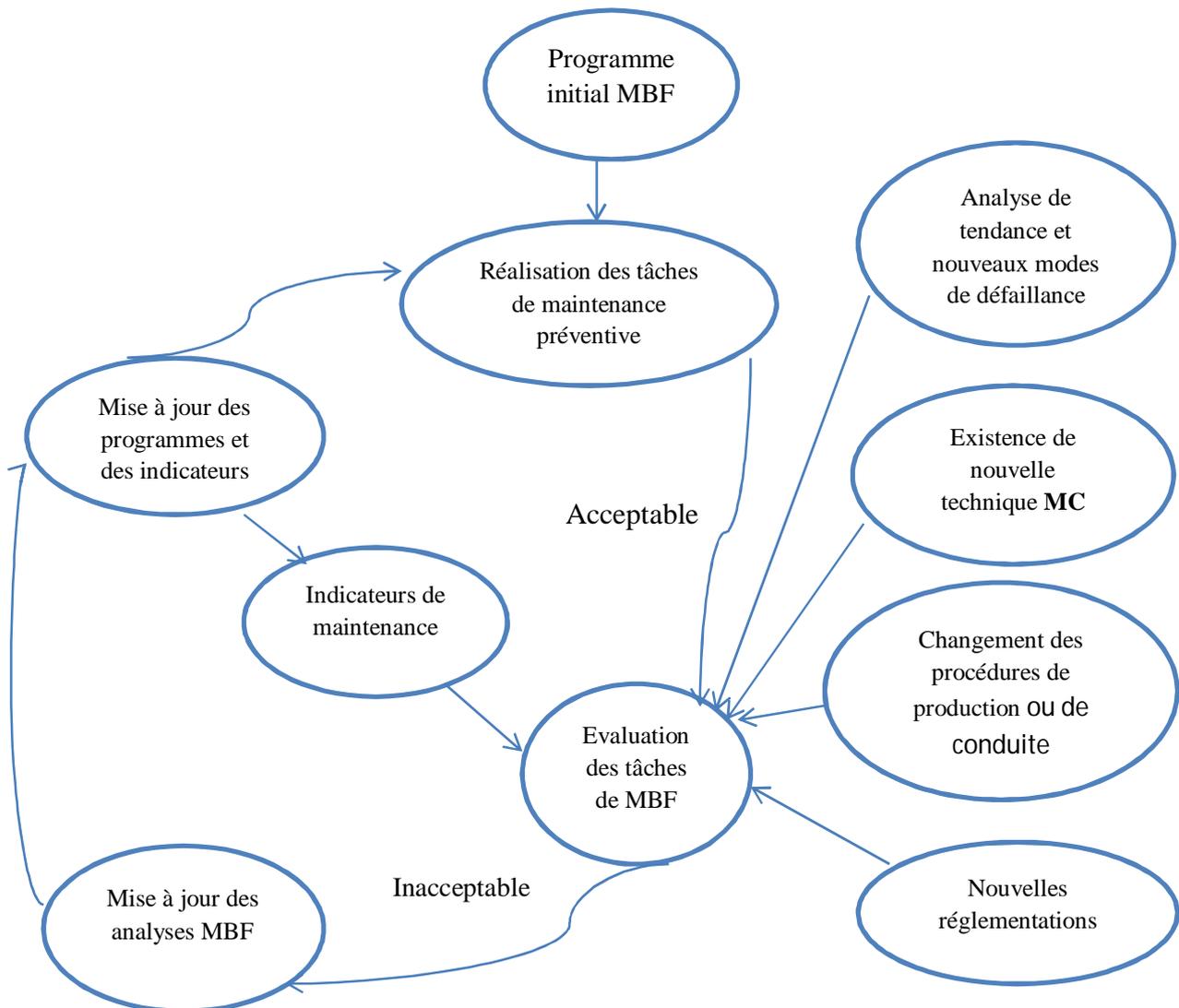
entreprises. L'objectif de cette tâche est d'identifier les différents facteurs qui peuvent conduire à modifier au cours du temps le programme initial de maintenance basée sur la fiabilité et de prendre les mesures correctives si nécessaire.

5.10.2. Documents nécessaire pour la réalisation de l'étape

Ce sont :

- La liste des indicateurs de performances,
- Les contraintes réglementaires (environnement, bruits, inspection, etc.),
- Les informations de fiabilité sur les événements survenus dans le passé sur l'installation concernée ou sur des systèmes similaires exploités sur d'autres sites,
- Les données de retour d'expérience sur les mécanismes de ruine actuels à la FDMS (fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sûreté),
- Les dossiers d'études des programmes initiaux de maintenance basée sur la fiabilité,
- Les dossiers de veille technologique sur l'évolution des techniques de maintenance conditionnelle.

5.10.3. Méthodes et outils pour la réalisation de l'étape



Principe du programme vivant MBF

- MC : Maintenance Conditionnelle

Les principes de la démarche pouvant conduire à des évolutions des programmes actuels de maintenance basée sur la fiabilité sont représentés sur la figure ().

5.10.4. Documents à produire à la fin de l'étape

Les documents à la fin de cette étape comprennent les documents issus des étapes 2 à 9, révisés d'un nouvel indice.

Application de la méthode de MBF à un groupe turbo-alternateur

L'exemple présenté ci-après reprend un cas d'analyse réel réalisé dans la Centrale d'Utilité deux (Cu 2) à FERTIAL ANNABA sur le groupe turbo-alternateur.

5.11 Etape 1 : Le découpage du groupe turbo-alternateur :

Source de vapeur

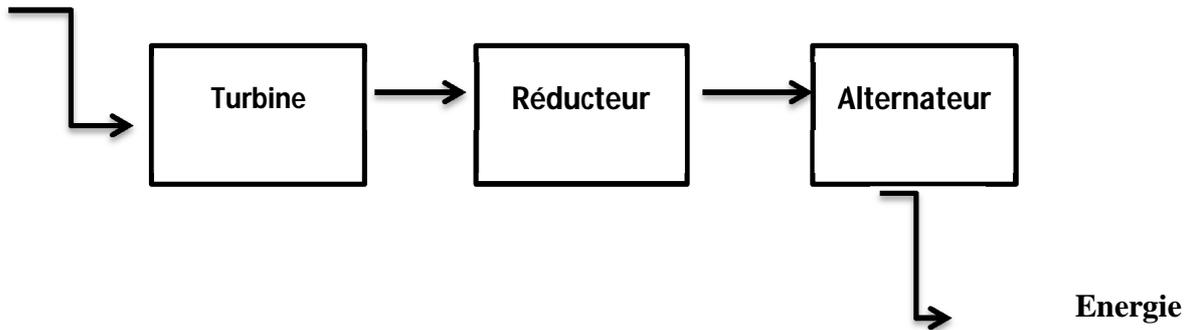


Figure 45 : Groupe turbo-alternateur

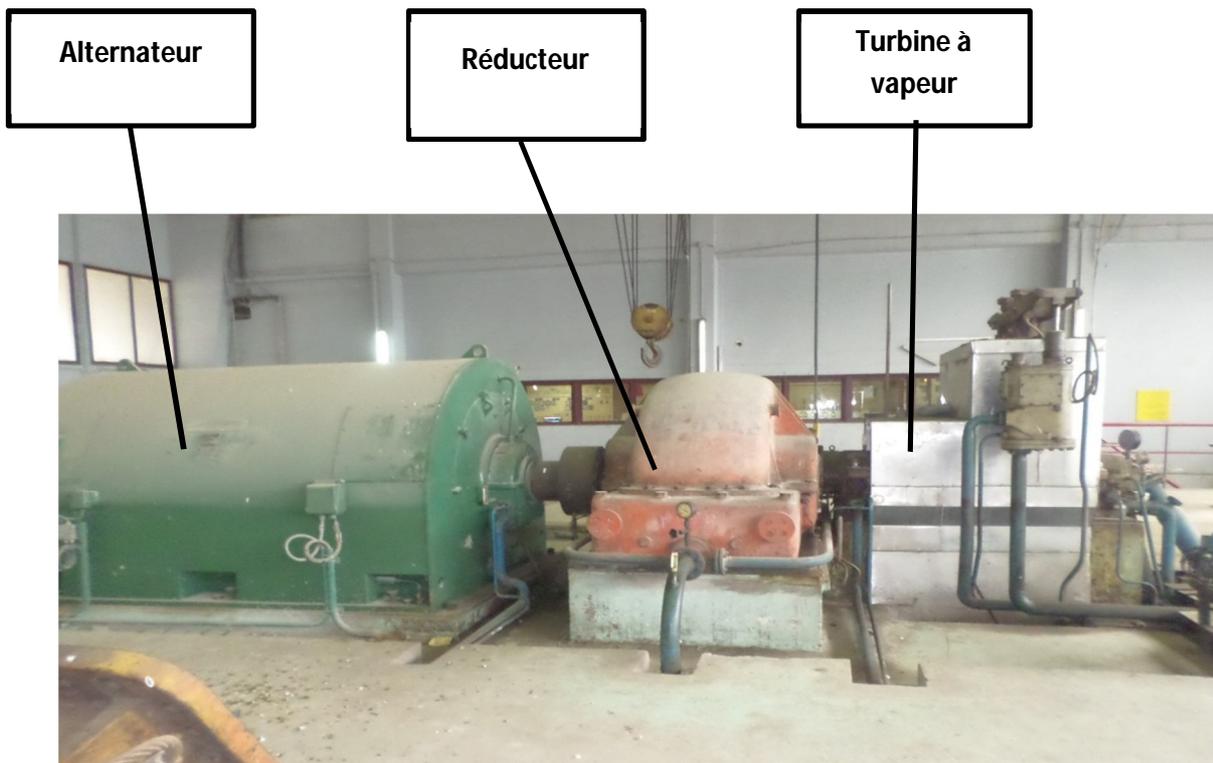


Figure 46 : Turbo-alternateur 10 MVA

5.1.1. Découpage du groupe turbo-alternateur

1-La Turbine à vapeur : « G400 »

2-Réducteur à engrenage : « SIEMENS T80 »

3-Alternateur « 10 MVA »

5.1.1. a. La Turbine à vapeur : « G400 »

5.1.1. a.1. Caractéristiques de fonctionnement

-puissance : 7845 kW

-vitesse : 9000t/m

5.1.1. a.2. Conditions de vapeur

		Min	Normal	Max
ADMISSION	Pression		40	
	temps		420	
EXHAPPEMENT	Pression		1.72	
	Temps		120	

5.1.1. a.3. Caractéristiques de construction :

- TYPE DE LA TURBIN : G 400
- diamètre moyen : 470 mm
- longueur des ailettes : 32 mm
- Nombre d'étages suivants : 19
- longueur des ailettes : 70mm
- Principe de fonctionnement : réaction
- Lubrification des paliers : huile

5.1.1. b. Alternateur « 10mva » :

- Marque : CEM
- Alternateur triphasé synchrone 10,000 kVa
- N° : FN32250
- Vitesse : 1500

- Fabrique à Nancy France

5.1.1. c. Réducteur à engrenage à chevron : « SIEMENS T80 »

- Désignation GZ 1164.2
- type : T80
- forme de construction : traine parallèle à chevron
- train d'engrenages parallèles à couple d'engrenage hélicoïdal double
- Rapport de vitesse : 5.33
- poids : 43 t

5.12 Etape 2 : Sélection des systèmes

Après le découpage de groupe turbo-alternateur, nous avons constitué un groupe d'employeur de Ferial (ingénieur en maintenance, les techniciens de la maintenance), pour aller à une analyse du calcul de criticité.

Ainsi des critères suivants permettent de calculer la criticité défaillance par chaque équipement.

F: Fréquence d'occurrence (taux de défaillance si disponible 1/MTBF)

G: Gravité (MTTR)

D : Probabilité de non détection (signez avant-coureur, temps mis pour détecter la défaillance)

Après une séance de brainstorming du groupe de travail, le résultat a été comme suit :

La criticité : $C = G.F.D$

Pour attribuer une note par critère et pour chaque équipement, l'évaluation des critères s'effectue à l'aide d'une échelle, comme suit :

Tableau 1. Echelle de criticité

Cotation	Fréquence	Turbine	alternateur	Réducteur
1	Une défaillance par an	×	×	
2	Une défaillance par trimestre			×
3	Une défaillance par mois			
4	Plusieurs défaillances par mois			
5	Plusieurs défaillances par semaine			
	Gravité			
1	Arrêt de production < 1 heure			
2	Arrêt de production < 1 jour		×	
3	1j < Arrêt de production < 1 mois			×
4	1mois < Arrêt de production	×		
	DéTECTABILITÉ			
1	< 1 heure			
2	Entre 1 heure et 1 jour	×	×	
3	> 1 jour			×
	C = F.G.D	8	4	18

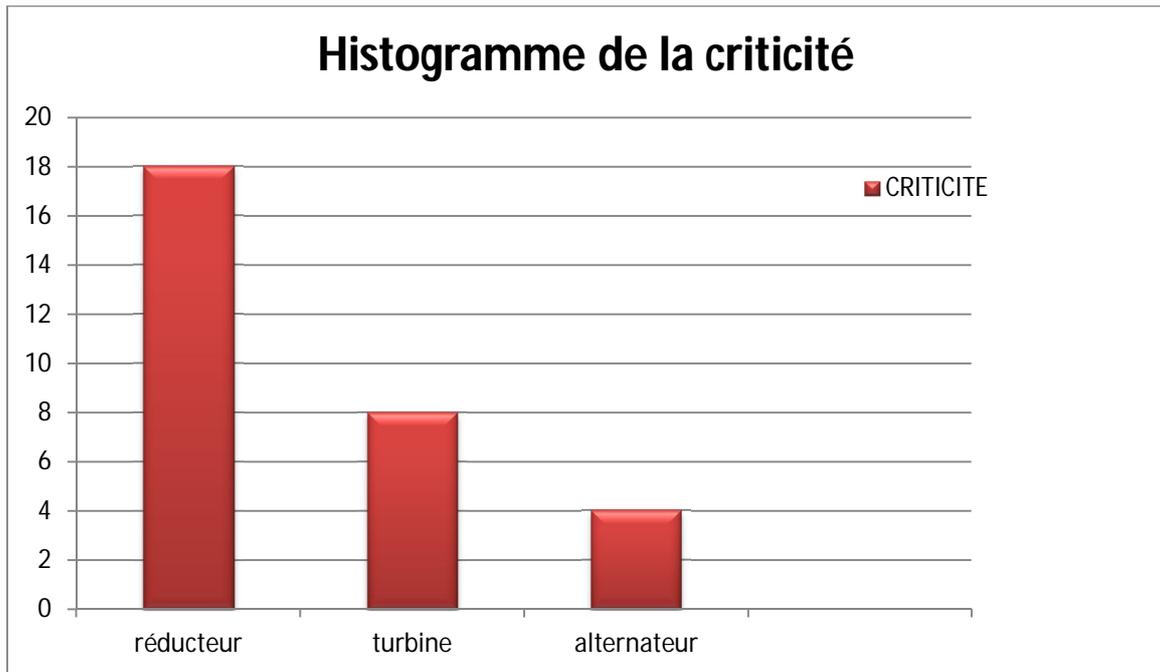


Figure 47 : Histogramme de la criticité

5.12.1. Choix de l'équipement :

D'après la **figure.47**, nous constatons que le réducteur de vitesses est le système critique dans le groupe.

❖ Donc, nous décidons de limiter l'étude sur le réducteur.

5.13 Etape3 : Identification des limites du système et sous-systèmes :

Après le choix de l'équipement le plus défaillant i.e. la zone critique dans le groupe turbo-alternateur dans l'étape précédente, on détermine les limites du système.

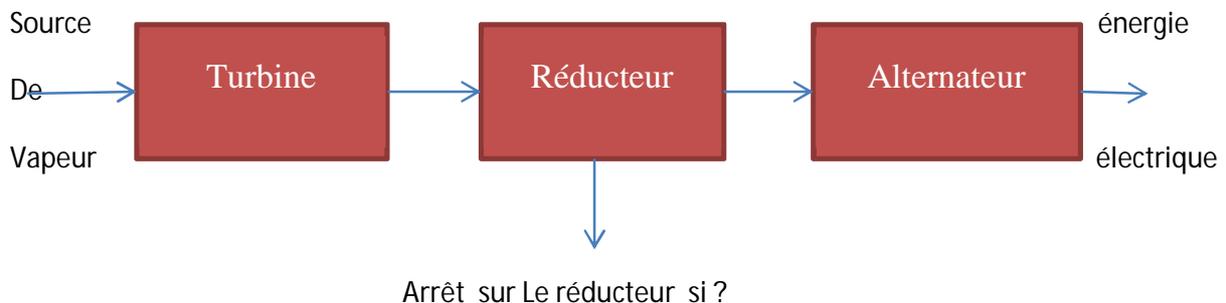


Figure 48 : Fonctionnement du système

5.13.1. Partie 1 :

La figure (48) démontre la liaison entre les entités du système, d'après ce schéma on distingue les limites du réducteur d'un point de vue global i.e. le système turbo-alternateur

Le réducteur ne fonctionne pas si :

- la turbine défectueuse
- mauvais sens de rotation
- surveillance de vitesses d'accouplement mal réglée
- alternateur ne démarre pas

5.13.2. Partie 2 :

Le réducteur ne fonctionne pas si un des sous-systèmes ou un élément est défectueux :

- L'engrenage défectueux
- Les paliers endommagés
- L'accouplement défectueux
- Système de lubrification

5.14 Etape4 : Identification des défaillances fonctionnelles

Il s'agit dans cette étape de dresser les fonctions des différents organes et de lister les défaillances pouvant survenir dans le système étudié. On peut citer :

5.14.1. Pompe de graissage d'engrenage défectueux

La pompe à huile

5.14.2. Manchon d'accouplement endommagé

Le manchon est dégradé à cause d'un défaut d'alignement des arbres

5.14.3. Choc accouplement-réducteur : - Chaque fois que le démarrage de la turbine se fait, la vitesse s'élève (nombre de tour n'est pas respecté) et cela provoque un choc au niveau de l'accouplement avec le réducteur,

5.14.4. Défaillance au niveau du palier

- les vibrations au niveau du palier
- Usure des paliers à cause du contact sec/limite



Figure 49: Usure de palier

5.14.5. Les défaillances liées aux engrenages :

Les engrenages sont la partie la plus importante dans la chaîne de transmission de puissance et la réduction de vitesse du système, plusieurs phénomènes provoquent des défaillances au niveau de l'engrènement :

- Phénomène de fatigue de contact.
- L'insuffisance de lubrifiante ou la mauvaise qualité,
- Les contraintes appliquées sur les engrenages,
- La rupture du film de lubrifiant dans la zone d'engrènement,
- etc.

Les défaillances dans notre cas sont :

- **Piqures**



Figure 50: piqures

- **Ecaillage**

L' écaillage affecte les surfaces actives cémentées. La couche de cémentation confère à l' engrenage une dureté superficielle accrue et élimine ainsi le phénomène d' usure

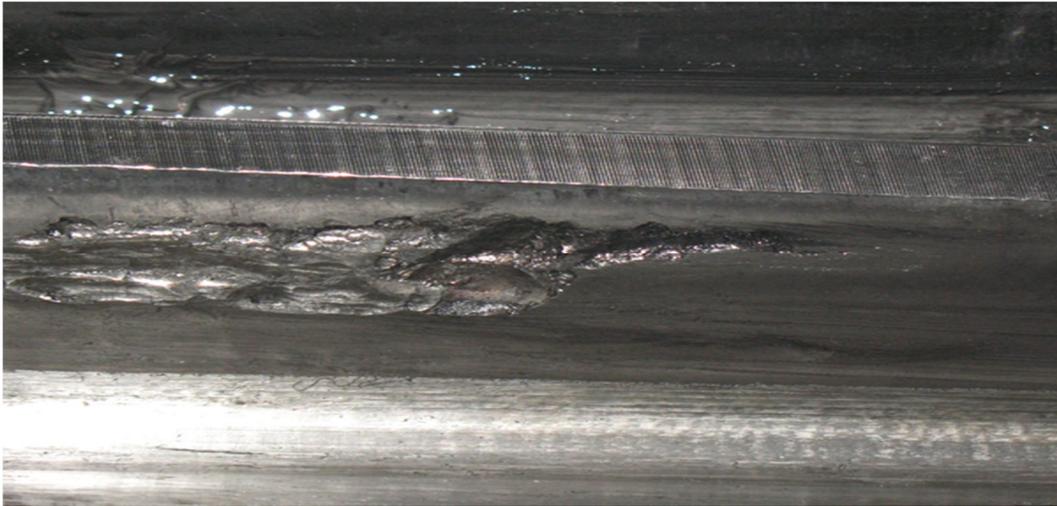


Figure 51: Ecaillage

- **La fissuration / Cassure**

le phénomène de propagation des fissures sur les dents de pignon et la roue,

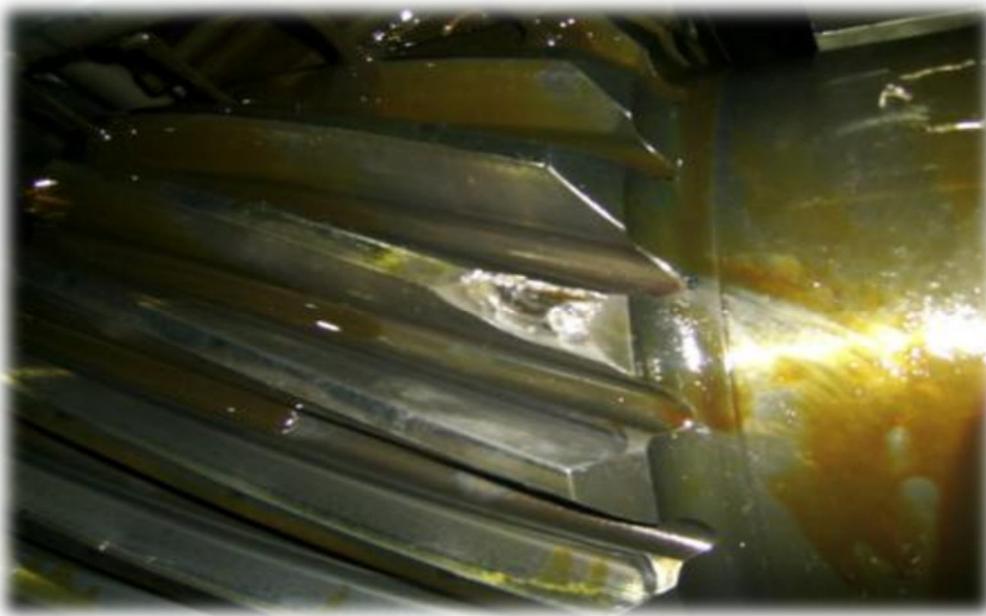


Figure 52 : Cassure au niveau de la dent

5.14.6. Dégradation cumulée de tous les phénomènes

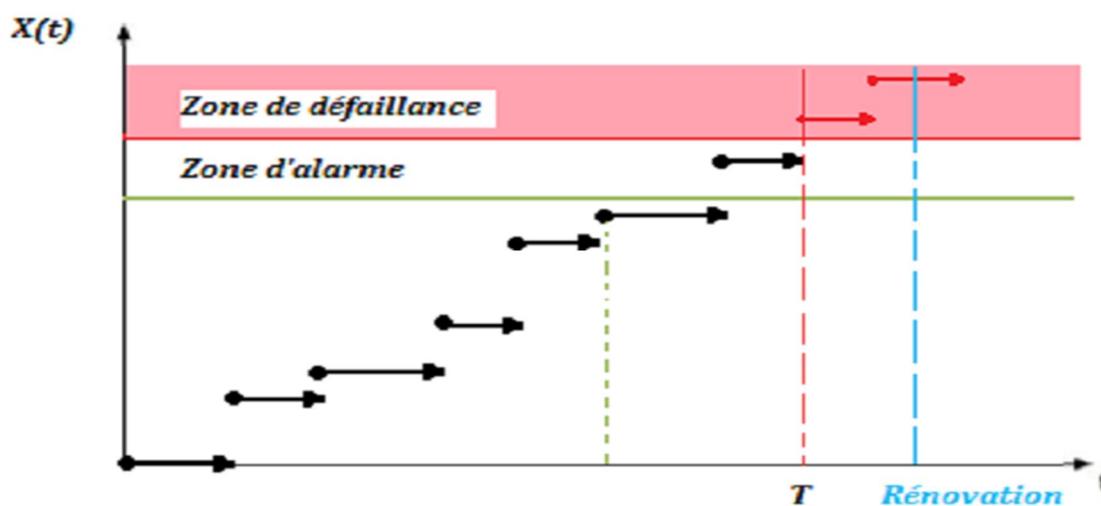


Figure 53 : Cumule de dégradation

5.15 Etape 5. Hiérarchisation de la criticité de défaillance :

Fonction	Défaillance	F	G	D	C= F*G*D
Lubrification	-Pompe de lubrification	1	1	1	1
accouplement	-choc d'accouplement	2	2	1	4
Support et guidage des arbres de transmission	-usure des paliers	1	2	3	6
Transmission de puissance et réduction de vitesse	- Piqures -Ecaillage - Fissuration / cassure	1	3	3	9

5.16 ETAPE 6 : Identification des matériels critiques et des causes

D'après la table de criticité de l'étape 5, on identifiera les défaillances au niveau des engrenages qui sont les plus critiques et les plus graves.

Défaillances	Causes
Piqures	Contrainte de cisaillement en surface
Ecaillage	Les forces de frottement sur les dents et la propagation
Fissuration / cassure	Contraintes et la puissance de transmission
Usure par abrasion	la présence de matières abrasives dans l'huile
Grippage	la rupture du film de lubrifiant

5.17. ETAPE 7 : Sélections des tâches de maintenance et de leur périodicité

D'une façon générale, des visites voire des inspections sont nécessaires pour le réducteur. Nous pouvons citer le plan général de maintenance suivant :

Opération	Fréquence	Observations
Inspection visuelle	Quotidienne	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle des fuites - Contrôle du bruit - Contrôle des paramètres de fonctionnement
Mesure du niveau d'huile et du niveau global de vibrations	Hebdomadaire	Refaire le niveau si nécessaire
Nettoyage du carter, de la centrale de lubrification et du filtre	Deux fois par mois	<ul style="list-style-type: none"> - Changement des filtres si c'est nécessaire - Inspection du reniflard
<ul style="list-style-type: none"> - Examen des dentures par un spécialiste - Contrôle des jeux de roulements et roulements/alésage - Contrôle des lignages 	Toutes les 6000 heures ou chaque année	
<ul style="list-style-type: none"> - Inspection carter ouvert - Inspection des alésages et dimensionnel - Contrôle par magnétoscopies des dentures 	Toutes les 50000 heures ou tous les 5 ans	
<ul style="list-style-type: none"> - Remplacement de tous les roulements 	Toutes les 50000 heures ou les 100000 heures en fonction de la durée de vie en conception	

Pour améliorer la fiabilité du réducteur, nous insistons sur les Conseils suivants :

- Vérifier et Réparer les fissures de carters, les porosités et défauts de fonderie
- Eviter les pièces de rechange qui passent par le laminage
- Réduction des mises au rebut en récupérant ou en prolongeant la vie des carters et des couvercles de réducteurs
- Eviter le laminage des paliers
- Réparer toujours les problèmes de la liaison et l'accouplement
- Assurer une meilleure tolérance de la liaison
- Eviter les fuites provenant des raccords filetés des circuits de lubrification et de refroidissement
- Dégraisser les pièces à l'aide du produit meilleur qualité
- Réparer les rayures axiales sur les portées cylindriques de l'arbre
- Accroître la fiabilité et la transmission d'efforts des engrenages montés sur arbres
- Eviter les micromouvements qui conduisent à l'usure
- Eliminer le glissement des accouplements occasionné par la perte de tension des vis
- Assurer la durée de vie des assemblages dans les conditions de montage sur site
- Elimination des risques de désalignement et de défaillance de l'accouplement
- Eviter le desserrage sous fortes charges et vibrations (entre le réducteur et la turbine)
- Assurez le montage des réducteurs en respectant les préconisations des constructeurs - Niveau 3 de maintenance
- Contrôler les jeux des paliers avant démontages
- Contrôleur de niveau : indicateur de niveau visuel, système à flotteur ou contrôle en continu) Contrôleur de débit ou de pression
- Nettoyage principal des carters de réducteurs, couvercles et toutes surfaces extérieures

5.18. Etape 8. Rédaction des procédures de maintenance et implantation

5.18.1. Introduction

Dans un contexte économique en constante évolution, nous assistons à un effort permanent de rationalisation et d'optimisation des activités et des budgets de la maintenance. La stratégie de Ferial doit nous apprendre à conjuguer " maintenance " avec " qualité", " sécurité ", " environnement ", " gestion des coûts ", et " performance ". En s'appuyant sur l'ISO 9001 / 2008, l'entreprise est accompagnée, pas à pas, dans l'instauration d'un management de la maintenance " bien huilé " et performant. Le système de management de la maintenance est basé sur un système documentaire dont la procédure est le point angulaire.

Une procédure est un document qui décrit de manière générale les activités d'un processus. Le détail est quant à lui laissé aux instructions ou aux modes opératoires.

Une procédure doit donc à la fois répondre aux exigences de l'entreprise et créer les conditions d'une application efficace. Pour cela, deux conditions doivent être remplies conjointement :

- **le fond** : le contenu de l'information doit être approprié, pertinent et suffisant ;
- **la forme** : elle doit participer à la bonne compréhension de l'information et par conséquent à la mise en œuvre de la procédure. La forme participe également à la gestion de la procédure en matière d'identification, d'élaboration, de diffusion, de révision.

5.18.2. Les étapes

5.18.2. a. Étape 1 : Identifier les procédures à créer ou à revoir

Les procédures imposées par la norme ISO 9001

La norme ISO 9001 n'impose que six procédures, qu'il est d'ailleurs possible de fusionner :

- procédure de maîtrise des documents ;
- procédure de maîtrise des enregistrements ;
- procédure d'audit interne ;
- procédure de traitement du produit non conforme ;
- procédure de maîtrise des actions correctives ;
- procédure de maîtrise des actions préventives.

Néanmoins, il est très souvent nécessaire de rédiger d'autres procédures. Mais alors pourquoi ? Comment identifier la nécessité de créer des procédures ou la possibilité de les simplifier/supprimer ?

Les questions à se poser

Face au besoin de créer une procédure ou de revoir une procédure existante, les questions à se poser sont toujours les mêmes. Les procédures sont ou seront-elles :

- utiles pour assurer la mise en œuvre des principes et des exigences des différents référentiels applicables dans le cadre spécifique de l'organisme ?
- exactes dans son contenu et dans sa forme ?

- complètes en respectant la condition « nécessaire et suffisante » ?
- compatibles avec les autres documents de l'entreprise (manuel, autres procédures, consignes, modes opératoires, instructions, etc.) et les autres systèmes de management ?
- claires et accessibles aux intéressés ?
- contrôlables dans sa mise en œuvre ?

En réponse à ces questions, on identifiera la nécessité de créer ou non, de revoir ou non vos procédures.

Il convient, en outre, de garder à l'esprit qu'une procédure doit répondre à un besoin et non l'inverse. Il convient donc d'analyser les besoins, et d'adapter la forme et le fond du document aux destinataires et utilisateurs de la procédure.

5.18.2.b. Étape 2 : Définir le contenu des procédures

Une fois les besoins identifiés vient la question du contenu. Quel niveau de détail doit présenter ma procédure ? La réponse à cette question est « pas trop de détails ! ». Les procédures sont un lien majeur entre tous les documents du système qualité. Elles ne présentent pas ...

5.18.2.c. Étape 3 : Définir la forme des procédures

Pour finir vient la question de la forme des procédures. Là encore, il n'y a pas d'exigences normatives sur la question. C'est à l'organisme de choisir en fonction prioritairement des attentes des utilisateurs du document. Certains préfèrent se référer à des textes alors que d'autres préfèrent la réglementation.

5.19. Étape 9 : Définition des indicateurs de maintenance

Un ensemble d'indicateurs doit être établi pour le suivi de l'efficacité et de l'efficience de la maintenance. Lors de notre stage à Fertial, nous avons demandé si le service de maintenance utilisé des indicateurs et des tableaux de bord. La réponse est non et pour cela que nous proposons quelques indicateurs simples d'utilisation mais très importants pour mesurer l'efficacité du service maintenance.

- a. Le préventif= Heures de maintenance préventive/Nombre d'interventions
- b. Le correctif= Heures de maintenance corrective/Nombre d'interventions
- c. Importance économique= Coût de maintenance/ Valeur à neuf
- d. Part de l'effectif maintenance= Effectif maintenance/ Effectif unité

- e. Coût horaire de maintenance= Budget Maintenance/ Heure d'intervention
- f. Taux de réalisation au plan= Nombre préventif réalisé/Nombre préventif prévu
- g. Temps moyen de prise en compte d'une demande corrective

5.20. Etape 10 : Evolution du programme de maintenance

Le programme de maintenance doit être établi en concertant le service exploitation. L'introduction d'un programme de maintenance dans une usine constitue un pas en avant considérable. En effet, un programme réussi se traduit par un accroissement important de la productivité qui s'explique essentiellement par une plus grande disponibilité des machines et par une réduction des coûts de maintenance. Une des premières étapes de la réduction des coûts de maintenance consiste à prendre conscience que le département de maintenance "produit un produit" qui s'appelle la capacité de production.

En effet, les conséquences d'une exploitation peu fiable sont le nombre élevé d'arrêts non planifiés, le déséquilibre des horaires de production, la détérioration de la qualité du produit, l'augmentation des coûts de fabrication et, plus que tout, la diminution des profits.

Aujourd'hui, comme la concurrence s'intensifie continuellement dans tous les secteurs de l'industrie, de plus en plus d'entreprises visent le "zéro-arrêt" en faisant de la maintenance une partie intégrante du procédé de fabrication. Une étude des différents aspects touchant à l'élaboration d'un programme de maintenance pouvant aider l'entreprise qui a pour priorité l'élimination des défaillances sur les machines dans le but d'accroître sa capacité de production, doit être menée et d'une manière judicieuse.

En effet, la maintenance conditionnelle a acquis depuis longtemps ses lettres de noblesse parmi les géants industriels de la pétrochimie. Il sera d'abord question d'aborder l'évolution dans les pratiques de maintenance de machines industrielles et des différents aspects avant de passer à la maintenance conditionnelle, suivies d'une étude des étapes à franchir dans la mise en place d'un programme de mesure. Vous vous familiariserez enfin avec les principales caractéristiques d'un logiciel de surveillance.

Jusqu'au début des années 70, c'est essentiellement la maintenance corrective qui prévaut dans l'industrie. Depuis, un accès accru aux outils informatiques a favorisé la mise en place de programmes de maintenance préventive. Au cours des années 80 sont apparus sur le marché des instruments de mesure capables d'identifier des problèmes sur les machines, d'en évaluer

leur condition et de prévoir leur besoin en entretien. De l'évolution de la technologie est née la maintenance conditionnelle. Aujourd'hui, il est de plus en plus question de maintenance proactive qui implique l'emploi des techniques d'entretien planifié (préventif et conditionnel) mais aussi le recours à des méthodes et des procédures (alignement de précision, vérification pré-opérationnelle, analyse des causes de défaillance, etc.) qui contribuent à augmenter la productivité de l'entreprise en réduisant les coûts de maintenance.

Bien que la maintenance corrective demeure toujours la méthode de maintenance pratiquée par la très grande majorité des entreprises entre autres Ferial, il n'en sera pas toujours ainsi. En effet, des études montrent comment les entreprises d'avant-garde réduisent déjà le recours à une maintenance de type corrective pour s'en remettre plutôt aux techniques de maintenance préventive, conditionnelle et proactive.

L'implantation d'un programme de maintenance préventive constitue un excellent début vers un meilleur contrôle des coûts et un accroissement important de la productivité. Le suivi d'un tel programme offre malgré tout peu de véritable garantie contre les défaillances imprévues.

5.21. Conclusion

Le but de la maintenance préventive est de fournir un contrôle des activités d'entretien planifié dans le but de réduire les défaillances et les dépenses associées à une maintenance de type purement corrective. Des études ont démontré qu'un programme réussi peut conduire à des réductions de 30 % des coûts de maintenance. Il existe toutefois un certain nombre de risques du fait de privilégier uniquement une maintenance préventive effectuée à intervalles réguliers. En effet, on rencontre des cas tels que :

- Des erreurs dans l'évaluation de la durée de vie d'un équipement. Cette situation peut conduire à un travail d'entretien excessif ou encore insuffisant, ce qui dans les deux cas n'est pas rentable.
- L'établissement d'intervalles de maintenance qui ne tiennent pas compte des défauts de jeunesse et des autres problèmes typiques associés au démarrage d'un nouvel équipement ou d'une machine nouvellement révisée.

- Un processus de dégradation où il n'existe pas de relation directe entre la fiabilité et l'âge d'un équipement, ce qui a pour conséquence le risque de subir un plus grand nombre d'arrêts non planifiés.

Dans ce chapitre, nous avons répondu à ces préoccupations en appliquant les étapes d'une étude de maintenance basée sur la fiabilité.

CONCLUSION GENERALE

La MBF s'attache en priorité à recenser les équipements critiques dont les conséquences des défaillances sont importantes pour les objectifs de l'entreprise (sécurité, disponibilité, coûts, maintenabilité, qualité, etc.). Afin de pouvoir sélectionner uniquement les équipements critiques, les différentes normes internationales ou les bonnes pratiques adoptées dans des secteurs industriels proposent des méthodes d'évaluation de leur criticité. Pour notre cas, nous avons commencé par une analyse des stratégies de maintenance liées la MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité). Ensuite, une étude sur les différents turbo alternateurs a été menée ce qui nous a conduit à calculer la criticité pour identifier l'organe devant être soumis à l'étude. Le réducteur étant choisi, une étude de sa fiabilité et de sa de sa maintenabilité s'est avérée nécessaire et a montré une insuffisance considérable. Ceci nous a conduit a faire une étude de dimensionnement du réducteur et à simuler les engrenages en déterminant les différents paramètres par KISSsoft. La dernière partie a été réservée à la mise en œuvre des dix étapes de la MBF du réducteur. Des propositions en ce sens ont été faites. Une organisation basée sur des groupes MBF au niveau de Fertial est à discuter et à mettre en œuvre pour une meilleure efficacité et une meilleure efficience de la maintenance dans l'entreprise.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) -[AFNOR, 2001] Norme NFX 50 -010 , (Afnor 2011)
- 2) -[Villemeur, 1997] Villemeur, A. Sécurité de fonctionnement des systèmes industriels. Ed. Eyrolles, 1997
- 3) -3[Remy, 2008] Rémy, E. Modèles d'évaluation quantitative de l'effet de la maintenance sur la fiabilité – état des lieux des recherches passées et en cours à EDF R&D. Actes du congrès Lambda Mu, Avignon, Octobre 2008
- 4) -4[Zille, 2007] Zille, V. Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance sur des systèmes complexes. Présentation dans le cadre du séminaire des thèses du département Management des risques industriels EDF-R&D. Chatou, Mars 2007.
- 5) -5[IEC, 2006] Techniques d'analyse de la fiabilité du système - Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). P-IEC 60812 {Ed.2.0}. Commission électrotechnique internationale, 2006.
- 6) -6[Cordier et al, 1993] Cordier, R., Despujols, A., Meuwisse, C. Sélection des tâches de maintenance – Concepts et définitions. Rapport EDF HP-28/93/029/B, 1993.
- 7) -7[Despujols, 2004] Despujols, A. Optimisation de la maintenance par la fiabilité. Techniques de l'ingénieur, dossier MT9310, 2004.
- 8) -8[Riali, 2012] Riali A. Talbi, A. Évaluation des stratégies de maintenance, CIGIMS, 2012.
- 9) -9[Zille, 2009] Zille, V. Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, Institut Charles Delaunay, 2009.
- 10) -10[Rausand & Hoyland, 2004] Rausand, M. Hoyland, A. System Reliability Theory – Models, Statistical Methods and Applications. Wiley, 2004.
- 11) -11[Nachlas, 2005] Nachlas, J.A. Reliability Engineering – Probabilistic Models and Maintenance Methods, Taylor & Francis, 2005.
- 12) -12[Lyonnet, 1999] Lyonnet, P. Optimisation d'une politique de maintenance. Edité par TEC ET DOC, 1999.
- 13) -13[Castanier, 2002] Castanier, B. Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, 2002.

- 14) -[Laure, 2001] Laure, E. Lapeyre, B. Introduction aux Méthodes de Monte-Carlo
Septembre 2001.
- 15) [ZWINGELSTEIN Gilles 1996], «la maintenance basée sur la fiabilité guide pratique
d'application de la RCM, Edition Hermès, paris, 1996

ANNEXE

Table de la loi de Weibull

β	A	B	β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,05	2,43290E+18	9,03280E+23	1,75	0,89062	0,52523	3,45	0,89907	0,28822	5,15	0,91974	0,20505
0,1	3,62880E+06	1,55977E+09	1,8	0,88929	0,51123	3,5	0,89975	0,28473	5,2	0,92025	0,20336
0,15	2,59357E+03	1,21993E+05	1,85	0,88821	0,49811	3,55	0,90043	0,28133	5,25	0,92075	0,20170
0,2	1,20000E+02	1,90116E+03	1,9	0,88736	0,48579	3,6	0,90111	0,27802	5,3	0,92125	0,20006
0,25	2,40000E+01	1,99359E+02	1,95	0,88671	0,47419	3,65	0,90178	0,27479	5,35	0,92175	0,19846
0,3	9,26053E+00	5,00780E+01	2	0,88623	0,46325	3,7	0,90245	0,27164	5,4	0,92224	0,19688
0,35	5,02914E+00	1,99761E+01	2,05	0,88589	0,45291	3,75	0,90312	0,26857	5,45	0,92272	0,19532
0,4	3,32335E+00	1,04382E+01	2,1	0,88569	0,44310	3,8	0,90379	0,26558	5,5	0,92320	0,19379
0,45	2,47859E+00	6,46009E+00	2,15	0,88561	0,43380	3,85	0,90445	0,26266	5,55	0,92368	0,19229
0,5	2,00000E+00	4,47214E+00	2,2	0,88562	0,42495	3,9	0,90510	0,25980	5,6	0,92414	0,19081
0,55	1,70243E+00	3,34530E+00	2,25	0,88573	0,41652	3,95	0,90576	0,25701	5,65	0,92461	0,18935
0,6	1,50458E+00	2,64514E+00	2,3	0,88591	0,40848	4	0,90640	0,25429	5,7	0,92507	0,18792
0,65	1,36627E+00	2,17887E+00	2,35	0,88617	0,40080	4,05	0,90704	0,25162	5,75	0,92552	0,18651
0,7	1,26582E+00	1,85117E+00	2,4	0,88648	0,39345	4,1	0,90768	0,24902	5,8	0,92597	0,18512
0,75	1,19064	1,61077	2,45	0,88685	0,38642	4,15	0,90831	0,24647	5,85	0,92641	0,18375
0,8	1,13300	1,42816	2,5	0,88726	0,37967	4,2	0,90894	0,24398	5,9	0,92685	0,18240
0,85	1,08796	1,28542	2,55	0,88772	0,37319	4,25	0,90956	0,24154	5,95	0,92729	0,18107
0,9	1,05218	1,17111	2,6	0,88821	0,36696	4,3	0,91017	0,23915	6	0,92772	0,17977
0,95	1,02341	1,07769	2,65	0,88873	0,36097	4,35	0,91078	0,23682	6,05	0,92815	0,17848
1	1,00000	1,00000	2,7	0,88928	0,35520	4,4	0,91138	0,23453	6,1	0,92857	0,17721
1,05	0,98079	0,93440	2,75	0,88986	0,34963	4,45	0,91198	0,23229	6,15	0,92898	0,17596
1,1	0,96491	0,87828	2,8	0,89045	0,34427	4,5	0,91257	0,23009	6,2	0,92940	0,17473
1,15	0,95170	0,82971	2,85	0,89106	0,33909	4,55	0,91316	0,22793	6,25	0,92980	0,17351
1,2	0,94066	0,78724	2,9	0,89169	0,33408	4,6	0,91374	0,22582	6,3	0,93021	0,17232
1,25	0,93138	0,74977	2,95	0,89233	0,32924	4,65	0,91431	0,22375	6,35	0,93061	0,17113
1,3	0,92358	0,71644	3	0,89298	0,32455	4,7	0,91488	0,22172	6,4	0,93100	0,16997
1,35	0,91699	0,68657	3,05	0,89364	0,32001	4,75	0,91544	0,21973	6,45	0,93139	0,16882
1,4	0,91142	0,65964	3,1	0,89431	0,31561	4,8	0,91600	0,21778	6,5	0,93178	0,16769
1,45	0,90672	0,63522	3,15	0,89498	0,31135	4,85	0,91655	0,21586	6,55	0,93216	0,16657
1,5	0,90275	0,61294	3,2	0,89565	0,30721	4,9	0,91710	0,21397	6,6	0,93254	0,16547
1,55	0,89939	0,59252	3,25	0,89633	0,30319	4,95	0,91764	0,21212	6,65	0,93292	0,16439
1,6	0,89657	0,57372	3,3	0,89702	0,29929	5	0,91817	0,21031	6,7	0,93329	0,16332
1,65	0,89421	0,55635	3,35	0,89770	0,29550	5,05	0,91870	0,20853	6,75	0,93366	0,16226
1,7	0,89224	0,54024	3,4	0,89838	0,29181	5,1	0,91922	0,20677	6,8	0,93402	0,16121

Table de test de kolmogorov Smirnov

$\alpha \backslash n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,01	1,0000	0,9950	0,9293	0,8290	0,7342	0,6685	0,6166	0,5758	0,5418	0,5133
0,05	1,0000	0,9750	0,8419	0,7076	0,6239	0,5633	0,5193	0,4834	0,4543	0,4300
0,10	1,0000	0,9500	0,7764	0,6360	0,5652	0,5094	0,4680	0,4361	0,4096	0,3875
0,15	1,0000	0,9250	0,7261	0,5958	0,5248	0,4744	0,4353	0,4050	0,3806	0,3601
0,20	1,0000	0,9000	0,6838	0,5648	0,4927	0,4470	0,4104	0,3815	0,3583	0,3391
$\alpha \backslash n$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,01	0,4889	0,4677	0,4490	0,4325	0,4176	0,4042	0,3920	0,3809	0,3706	0,3612
0,05	0,4092	0,3912	0,3754	0,3614	0,3489	0,3376	0,3273	0,3180	0,3094	0,3014
0,10	0,3687	0,3524	0,3381	0,3255	0,3142	0,3040	0,2947	0,2863	0,2785	0,2714
0,15	0,3425	0,3273	0,3141	0,3023	0,2918	0,2823	0,2737	0,2659	0,2587	0,2520
0,20	0,3226	0,3083	0,2957	0,2847	0,2748	0,2658	0,2577	0,2503	0,2436	0,2373
$\alpha \backslash n$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
0,01	0,3524	0,3443	0,3367	0,3295	0,3229	0,3166	0,3106	0,3050	0,2997	0,2947
0,05	0,2941	0,2872	0,2809	0,2749	0,2693	0,2640	0,2591	0,2544	0,2499	0,2457
0,10	0,2647	0,2586	0,2528	0,2475	0,2424	0,2377	0,2332	0,2290	0,2250	0,2212
0,15	0,2459	0,2402	0,2348	0,2298	0,2251	0,2207	0,2166	0,2127	0,2089	0,2054
0,20	0,2315	0,2261	0,2211	0,2164	0,2120	0,2079	0,2040	0,2003	0,1968	0,1934

$\alpha \backslash \tau_l$	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
0,01	0,2899	0,2853	0,2809	0,2768	0,2728	0,2690	0,2653	0,2618	0,2584	0,2552
0,05	0,2417	0,2379	0,2342	0,2308	0,2274	0,2242	0,2212	0,2183	0,2154	0,2127
0,10	0,2176	0,2141	0,2108	0,2077	0,2047	0,2018	0,1991	0,1965	0,1939	0,1915
0,15	0,2021	0,1989	0,1958	0,1929	0,1901	0,1875	0,1849	0,1825	0,1801	0,1779
0,20	0,1903	0,1873	0,1844	0,1817	0,1791	0,1766	0,1742	0,1718	0,1696	0,1675
$\alpha \backslash \tau_l$	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
0,01	0,2521	0,2461	0,2406	0,2354	0,2306	0,2260	0,2217	0,2177	0,2138	0,2102
0,05	0,2101	0,2052	0,2006	0,1963	0,1922	0,1884	0,1848	0,1814	0,1782	0,1752
0,10	0,1891	0,1847	0,1805	0,1766	0,1730	0,1696	0,1664	0,1633	0,1604	0,1577
0,15	0,1757	0,1715	0,1677	0,1641	0,1607	0,1575	0,1545	0,1517	0,1490	0,1465
0,20	0,1654	0,1616	0,1579	0,1545	0,1514	0,1484	0,1456	0,1429	0,1404	0,1380
$\alpha \backslash \tau_l$	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
0,01	0,2067	0,1988	0,1917	0,1853	0,1795	0,1742	0,1694	0,1649	0,1608	0,1570
0,05	0,1723	0,1657	0,1597	0,1544	0,1496	0,1452	0,1412	0,1375	0,1340	0,1308
0,10	0,1551	0,1491	0,1438	0,1390	0,1347	0,1307	0,1271	0,1238	0,1207	0,1178
0,15	0,1441	0,1385	0,1336	0,1291	0,1251	0,1214	0,1181	0,1150	0,1121	0,1094
0,20	0,1357	0,1305	0,1258	0,1216	0,1178	0,1144	0,1112	0,1083	0,1056	0,1031
$\alpha \backslash \tau_l$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
0,01	0,1534	0,1470	0,1413	0,1362	0,1316	0,1275	0,1237	0,1203	0,1171	0,1142
0,05	0,1279	0,1225	0,1178	0,1135	0,1097	0,1063	0,1031	0,1003	0,0976	0,0952
0,10	0,1151	0,1103	0,1060	0,1022	0,0988	0,0957	0,0929	0,0903	0,0879	0,0857
0,15	0,1070	0,1025	0,0985	0,0950	0,0918	0,0889	0,0863	0,0839	0,0817	0,0796
0,20	0,1008	0,0965	0,0928	0,0895	0,0865	0,0838	0,0813	0,0790	0,0769	0,0750

Table de la loi log normale

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986