

Introduction générale

Un système de production est conçu dans l'objectif d'accomplir une mission de production des biens ou des services, dans des délais raisonnables et à un coût optimisé afin de satisfaire la demande des clients. Il est clair que la satisfaction du client doit être mesurée en termes de coût, de délai, de qualité du produit et du service offert. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place des politiques d'organisation et de gestion de l'outil de production afin de satisfaire au mieux cet objectif de qualité. Or, un système de production est soumis à des pannes aléatoires qui perturbent la production et peut entraîner une perte des demandes clients. Par conséquent, la maintenance de l'outil de production est nécessaire pour le bon accomplissement des opérations de production. Afin d'améliorer la fiabilité des outils de production, la mise en place des stratégies de maintenance de l'outil de production s'impose.

Le développement économique a engendré une concurrence intense entre les secteurs industriels. Cette concurrence s'est propagée sur le plan international et s'est caractérisée par l'implantation des entreprises étrangères partout dans le monde et parfois dans le même pays et ce, pour des raisons économiques et logistiques.

Dans le domaine industriel, l'évolution technique a contribué à l'amélioration de la situation des entreprises en termes de fiabilité et de réduction du nombre d'interventions. Cette amélioration s'accompagne par une bonne gestion des outils et des moyens techniques ainsi qu'une exigence en personnels de plus en plus spécialisés. Malgré le niveau de fiabilité atteint, le « zéro panne » reste impossible.

De ce fait, avec un nombre important de dysfonctionnements, les entreprises industrielles doivent à la fois produire, améliorer leurs outils de production et assurer le maintien en condition opérationnelle de leurs équipements. C'est ainsi que des solutions pratiques sont indispensables. En effet, afin d'assurer une rapidité de remise en état des équipements en panne, des solutions aussi bien stratégiques et méthodologiques que techniques sont nécessaires. À cet égard, il est essentiel de prendre un critère d'efficacité de ces méthodes qui dépendra du gain, aussi bien économique qu'au niveau fiabilité et rapidité. Ces critères agiront, par conséquent, sur le coût de la maintenance et sur la disponibilité des sites de production et leurs productivités.

Dans le secteur de l'industrie, au départ, les activistes de maintenance ont été considérés comme une sous fonction de la production, et leurs rôles étaient rarement pris en compte comme une activité stratégique au sein de l'entreprise. Ils se résumaient à l'entretien et/ou dépannage ou aux actions de réparation après détection d'une défaillance. L'objectif est de remettre rapidement en service le système sans faire au préalable une analyse des causes et conséquences des défaillances. Ces actions d'entretien effectuées au cas par cas peuvent être justifiées par la complexité croissante des équipements et la non-prise en compte de la maintenance dans la phase de conception. Cependant, sous les effets conjugués de la crise économique et de la concurrence internationale, la fonction maintenance ne cesse d'évoluer entraînant des contraintes incontournables liées aux exigences de la baisse des coûts de production des biens et des services.

Au début des années quatre-vingt, la régularisation des actions de maintenance et des budgets associés a été caractérisée par une évolution exceptionnelle. L'apparition des méthodes relatives à la sûreté de fonctionnement, notamment la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité, a joué un rôle primordial dans cette évolution. Ces méthodes ont été appliquées dans certaines industries telles que les transports, la pétrochimie et les centrales nucléaires, les industries minérales, les départements de production et de maintenance sont les plus importants en termes de personnel, chacun d'eux comportant environ 30% de la main d'œuvre totale.

Dans le secteur industriel, l'optimisation de la maintenance est basée sur la connaissance de la fiabilité des équipements et des politiques de maintenance adaptées. Les applications de ces politiques ont montré une grande amélioration au niveau de la performance triangulaire des systèmes industriels coût, qualité, et délai.

1. Problématique de la thèse

Cette thèse a pour objectif général le développement et l'optimisation de nouvelles stratégies de maintenance intégrées à la production tout en tenant compte de l'effet de la dégradation des systèmes de production et l'impact économique des actions de maintenance sur le rendement des organisations industrielles. Ces différentes stratégies sont étudiées sous différents types de maintenance préventive et corrective.

Le manuscrit est structuré en quatre chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre a été consacré à la présentation de la revue bibliographique de la fonction maintenance dans les systèmes de production qui consiste à définir une politique de gestion de maintenance liée à la production. Au début du chapitre, le rôle du service maintenance dans le management de l'entreprise est abordé. Ensuite, les différentes stratégies ainsi que les politiques de maintenance sont détaillées.

Le 2^{ème} chapitre traite la relation entre la fonction maintenance et la fonction production et l'intégration entre les deux ainsi que la classification des systèmes de production tenant compte de la dégradation du système de production.

Le 3^{ème} chapitre est consacré à la mise en place d'un plan de maintenance préventive afin d'améliorer et optimiser la stratégie de maintenance par l'augmentation de la disponibilité des équipements de production et la minimisation de temps d'arrêt de production. Nous établirons aussi un modèle analytique qui sera comme un outil d'aide à la décision du choix de la stratégie à adopter par l'exploitation et l'amélioration de la méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur Fiabilité (MBF) ainsi que la méthode Total Productive Maintenance (TPM).

Le 4^{ème} chapitre est réservé aux études de cas afin de montrer l'intérêt de ce travail dans l'industrie, et d'avoir une application réelle par des études de cas qui sont faites pour évaluer les stratégies de maintenance ce qu'on a vu théoriquement dans le 3^{ème} chapitre et d'implanter les étapes nécessaires à la mise en place d'un plan de maintenance préventive. La discussion de quelques indicateurs sont nécessaires pour le suivi et l'optimisation d'un tel plan de maintenance, cette mise en place pour atteindre une stratégie de maintenance optimale à appliquer dans les organisations industrielles. Vers la fin, on conclut ce travail en donnant des perspectives.

2. Objectifs de la thèse

Le but recherché par cette thèse est de proposer des politiques de maintenance efficaces qui doivent à la fois satisfaire les critères techniques, maximiser l'impact stratégique et optimiser les critères économiques. L'amélioration de productivité, de flexibilité, de sécurité des unités de production ainsi que l'optimisation des critères économiques nécessitent la création d'une dynamique de progrès continu entre le service Production et le service Maintenance par l'amélioration de la méthode d'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (MBF) et l'exploitation de la méthode Total Productive Maintenance (TPM).

3. Méthodologie suivie

Notre méthodologie de recherche se base sur une étude approfondie de l'état de l'art sur la relation entre la stratégie de la fonction maintenance et la fonction production dans les organisations industrielles. Ceci afin de constituer une idée et une vision globale sur le thème de la recherche, par la suite nous allons essayer d'étudier et améliorer les étapes de la maintenance préventive et de la comprendre et d'expliquer la problématique des deux côtés théorique et pratique, et vers la fin nous allons essayer de modéliser les problèmes et de proposer des solutions d'amélioration.

Dédicaces

À mes chers parents que Dieu les protège.

À ma très chère femme.

À mon cher fils Ahmed

À mes frères et ma sœur.

À tous les membres de ma famille.

À tous ceux qui m'ont enseigné

À tous mes amis,

Je dédie ce travail.

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été accompli au sein de l'équipe du Laboratoire de Génie Industriel.

Je souhaite remercier très vivement la personne sans laquelle cette recherche aurait été plus difficile. J'exprime en effet toute ma profonde gratitude à mon directeur de thèse responsable du laboratoire de Génie industriel, le professeur **Mustapha MABROUKI**, ses précieux conseils, commentaires et aides. Pour tous ses efforts. Les mots me manquent pour lui exprimer toute ma profonde gratitude pour sa disponibilité permanente, sa contribution majeure à l'orientation des travaux de recherche et ses idées originales qui ont servi à enrichir le contenu de cette thèse. Les longues heures de discussions qu'il m'a consacrées m'ont permis d'apprécier l'étendue de ses compétences scientifiques, ses connaissances et ses qualités professionnelles et humaines. Il était toujours proche de moi dans ma formation de chercheur, et qui par sa sagesse et sa compétence a semé en moi l'amour de la science. Il m'a toujours apporté culture et finesse scientifique. J'ai agréablement aimé travailler avec lui, je suis fier d'être son étudiant. J'espère avoir été digne de cette confiance.

Que le professeur **Mourad KADDIRI** de la Faculté des Sciences et Techniques de Béni-Mellal, trouve ici mes remerciements les plus chaleureux, pour sa disponibilité, sa rigueur scientifique, ses remarques objectives et constructives, son aide et ses qualités humaines. Sa compétence et ses idées foisonnantes m'ont permis de progresser et m'ont réellement donné goût aux aspects de la recherche. Mon estime pour lui n'a d'égal que sa gentillesse et sa disponibilité. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

Je tiens à remercier chaleureusement l'ensemble des membres du jury Jamaa BENGOURRAM, Amane OUERAGLI, Nourre-eddine KOUIDER, et Mustapha ZEKRAOUI, qui m'ont honoré d'avoir accepté d'évaluer mon travail de thèse, Je les remercie pour le temps qu'ils m'ont consacré afin de corriger les erreurs et les omissions.

Je tiens également à remercier vivement l'ensemble des chercheurs du laboratoire génie industriel de la Faculté des Sciences et Techniques, Beni Mellal pour leurs aides scientifiques et l'ambiance amicale dans laquelle s'est déroulé ce travail.

Finalement, j'adresserai mon dernier remerciement à ma famille, j'adresse tous mes remerciements à mes parents et mon épouse, mon enfant, mes frères qui m'ont soutenue et qui n'ont épargné aucun effort pour m'aider.

Résumé

La mise en place d'un plan de maintenance permet d'optimiser les opérations de maintenance et surtout de les effectuer au bon moment, l'objectif final étant d'assurer la qualité du produit et d'améliorer le taux de disponibilité des équipements pour augmenter la productivité. Ainsi, lors du choix de la méthode de maintenance, il faut arbitrer entre les performances que l'on souhaite obtenir du système de production et les stratégies que l'on est prêt à assumer pour le maintenir, tout en tenant compte de la fiabilité des équipements et de la sécurité des personnes et des installations.

Les développements de cette thèse s'inscrivent dans un contexte industriel d'ouverture du marché qui oblige les producteurs à être plus compétitifs et plus réactifs à ces variations. Pour gérer au mieux les performances des installations, il est nécessaire d'améliorer les performances des programmes de maintenance avec l'application de la méthode de Maintenance basée sur la fiabilité (MBF) et l'utilisation croissante de la maintenance préventive. Nous nous sommes intéressés au développement de démarches dont l'objectif est d'aboutir à un outil d'aide à la décision pour construire des programmes de maintenance en effectuant des choix entre les différentes alternatives identifiées suite à l'application de la MBF.

Le cadre général du mémoire s'articule autour de l'impact de la stratégie de maintenance sur le rendement des organisations industrielles. Nous nous intéressons, A la relation entre la stratégie de la fonction maintenance et la fonction production dans les organisations industrielles et aux méthodes d'optimisation de la maintenance. Nous avons donné un intérêt particulier à l'amélioration de la méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité (OMF) ainsi que la méthode Total Productive Maintenance (TPM) et expliquer la problématique théoriquement et pratiquement et proposer des solutions d'améliorations. Des études de cas sont faites pour évaluer les modèles analytiques proposées de la stratégie de maintenance préventive qu'on a vu théoriquement.

Enfin, pour que la gestion de maintenance soit efficace aussi bien sur le plan technique qu'économique de l'entreprise, des stratégies de maintenance sont déterminées pour chaque équipements de production.

MOTS CLÉS : Maintenance, Fiabilité, Maintenabilité, Productivité, TPM, MBF, OMF, TRS.

Abstract

The implementation of a maintenance plan permits to optimize maintenance operations and especially to carry them out in the right time moment, the ultimate goal being to ensure the quality of the product and to improve the availability rate of equipment to increase productivity. Thus, when choosing the maintenance method, it is necessary to arbitrate between the performances that one wishes to obtain from the production system and the strategies that one is ready to assume to maintain it, while taking into account the reliability of the equipment and the safety of people and facilities.

The developments in this thesis are part of an industrial context of market opening which requires producers to be more competitive and more responsive to these variations. To better manage the performance of facilities, it is necessary to improve the performance of maintenance programs, with the application of the MBF method and the increasing use of preventive maintenance. We are interested in developing approaches whose objective is to achieve a tool for decision support for building maintenance programs making choices between alternatives identified through the application of MBF.

The general framework of the dissertation revolves around the impact of the company's maintenance and performance strategy. We are interested in the relationship between the strategy of the maintenance function and the production function in industrial organizations and to methods of optimizing maintenance. We have given a particular interest to the improvement of the method of Optimization of Maintenance by Reliability (OMF) as well as the method Total Productive Maintenance (TPM) and explain the problem of one side theoretical and on the other side practical and propose improving solutions. Case studies are done to evaluate the models of the preventive maintenance strategy that we have seen theoretically.

Finally, to make the maintenance management effective, on the technical level as well as on the economic level, an optimal maintenance strategy is determined for each machine

KEYWORDS: Maintenance, Reliability, Maintainability, Productivity, TPM, MBF, OMF, TRS.

ملخص

يَسمح وضعُ وتطبيق برامج الصيانة في الوقت المناسب ب: تحسين عملياتها من أجل الحصول على منتج بجودة عالية، وتطوير معدل اشتغال المعدات الانتاجية ومن ثمَّ عند اختيار طريقة الصيانة يجب علينا الفصل بين المردود المراد الحصول عليه من نظام الإنتاج والاستراتيجيات التي نريد تطبيقها، مع مراعاة إمكانية اشتغال المعدات وسلامة الأفراد والمنشآت.

تطوراتُ هذه الأطروحة هي جزءٌ من السياق الصناعي للانفتاح على السوق يتطلب من المنتجين أن يكونوا أكثر قدرةً على المنافسة، وأكثر استجابةً للمتغيرات لتحسين إدارة أداء المنشآت، إذن من الضروري تحسين أداء برامج الصيانة ب: تطبيق و زيادة استخدام الصيانة الوقائية لتفادي حدوث أعطاب أثناء الاستخدام.

إننا نهتم في هذه الرسالة بتطوير أداة دعم لصياغة برامج الصيانة عن طريق: تطبيق الصيانة القائمة على أساس تحسين معدل اشتغال المعدات الإنتاجية (MBF).

يدور الإطار العام للرسالة حول تأثير استراتيجيات الصيانة والأداء للشركات، حيث نهتم بالعلاقة بين استراتيجية وظيفة الصيانة، ووظيفة الإنتاج في المؤسسات الصناعية وطرق تحسين هذه العملية.

لقد أولينا اهتمامًا خاصًا لتحسين طرق الصيانة من خلال تطبيق تقنية الصيانة القائمة على أساس تحسين معدل اشتغال المعدات الإنتاجية (MBF)، وكذلك طريقة الصيانة الإنتاجية الشاملة (TPM)، وشرح المشكلة من الناحية النظرية والعملية واقتراح حلول تحسينية. وبعد ذلك تم إجراء مجموعة دراسات الحالة لتقييم النماذج التحليلية المقترحة لاستراتيجية الصيانة الوقائية التي رأيناها نظريًا.

أخيرًا، لكي تكون إدارة الصيانة فعالة تقنيًا واقتصاديًا، يتم تحديد استراتيجيات الصيانة المثالية لكل معدات الإنتاج.

الكلمات الرئيسية: الصيانة، الإنتاجية، TPM، MBF، OMF، TRS.

Liste des tableaux

CHAPITRE I :

Tableau I.1. Classification des actions de maintenance4

Tableau I.2. Ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance5

CHAPITRE II :

Tableau II.1. La relation entre Le système de production les autres systèmes de l'entreprise . 28

Tableau II.2. Classification des systèmes de production 29

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1. Durée d'arrêt d'engin TORO 102

Tableau IV.2. Durée d'arrêt des organes De l'engin TORO 102

Tableau IV.3. Les valeurs de la ration RD 103

Tableau IV.4. Définition des groupes 104

Tableau IV.5. Durée d'arrêt de l'engin JUMBO 104

Tableau IV.6. Durée d'arrêt des organes de l'engin JUMBO 105

Tableau IV.7. Les valeurs de la ration RD 106

Tableau IV.8. Définition des groupes 106

Tableau IV.9. MTBF et MTTR pour les trois organes de l'engin TORO 114

Tableau IV.10. MTBF et MTTR pour les trois organes de l'engin JUMBO 114

Tableau IV.11. Les actions de maintenance pour les trois organes de l'engin TORO 115

Tableau IV.12. Les actions de maintenance pour les trois organes de l'engin JUMBO 115

Tableau IV.13. causes probables de chute de débit du broyeur 125

Tableau IV. 14. échelle de notation de la fréquence 131

Tableau IV. 15. Echelle de notation de la gravité 131

Tableau IV. 16. Echelle de notation de non détection 131

Tableau IV. 17. Les caractéristiques techniques 132

Tableau IV. 18. Grille de l'AMDEC du broyeur 136

Tableau IV. 19. Classement des éléments par criticité 138

Tableau IV. 20. Mailles des tamis disponible 142

Tableau IV. 21. Caractéristiques du broyeur 145

Tableau IV. 22. Résultats de l'analyse par tamisage pour C1	148
Tableau IV. 23. Mesure de la hauteur libre pour le compartiment 1	151
Tableau IV. 24. Résultats de l'analyse par tamisage pour le compartiment 2.....	151
Tableau IV. 25. Mesure de la hauteur libre pour le compartiment 1	153
Tableau IV. 26.Résultats d'analyse par tamisage de types de clinker produits	154
Tableau IV. 27. La répartition proposée des boulets pour Le compartiment 1	155

Liste des figures

CHAPITRE I :

Figure I.1 : décomposition fonctionnelle de la maintenance	6
Figure I.2 : processus de déroulement d'une maintenance corrective sur un système ou un équipement	9
Figure I.3 : diagramme des différents concepts de maintenance	11
Figure I.4 : les diverses options de la maintenance	14
Figure I.5 : évolution de la maintenance depuis 1940	16
Figure I.6 : la maintenance dans la conduite du système de production	18

CHAPITRE II :

Figure II.1 : modèle conceptuel d'un système de production	34
Figure II.2 : classification des défaillances par type	37
Figure II.3 : classification des défaillances par cause	38

CHAPITRE III :

Figure III.1: fonction globale de politique de maintenance préventive	61
Figure III.2: choix d'une politique de maintenance	62
Figure III.3 : chemin logique de la mise en œuvre d'une maintenance préventive	65
Figure III.4 : méthode d'optimisation basée sur la fiabilité	70
Figure III.5 : les étapes de l'O.M.F	72
Figure III.6: la structure générale du modèle de décision de gestion de la maintenance	73
Figure III.7: processus d'analyse du mécanisme de défaillance	74
Figure III.8: l'évaluation des performances d'un programmes de maintenance de type OMF	77
Figure III.9 : modèle de gestion de la maintenance	79
Figure III.10: module d'analyse de la maintenance Carte de processus de la méthodologie de sélection de la stratégie de maintenance appropriée	80
Figure III.11 : la définition des différents ratios	89

CHAPITRE IV :

Figure IV.1 : image du TORO	93
Figure IV.2 : cadre avant du TORO	93

Figure IV.3 : les éléments du moteur de TORO	94
Figure IV.4 : partie de transmission	95
Figure IV.5 : image du JUMBO	98
Figure IV.6 : section avant du JUMBO	98
Figure IV.7 : le marteau du JUMBO	99
Figure IV.8 : la glissière du JUMBO	99
Figure IV.9 : le bras du JUMBO	100
Figure IV.10 : bras et glissière	101
Figure IV.11 : classification des engins selon le temps d'arrêt	102
Figure IV.12 : présentation de la courbe ABC pour TORO	103
Figure IV.13 : classification des engins selon le temps d'arrêt	104
Figure IV.14 : présentation de la courbe ABC pour JUMBO	105
Figure IV.15 : représentation schématique des temps nécessaires au calcul du Taux de Rendement Synthétique	108
Figure IV.15 : schéma simplifié du broyeur	118
Figure IV.16 : diagramme causes à effet de chute de débit	122
Figure IV.17 : diagramme bête à cornes	126
Figure IV.19 : analyse du besoin du broyeur	132
Figure IV.20 : diagramme de bête à cornes	133
Figure IV.21 : diagramme de la pieuvre du broyeur	133
Figure IV.22 : analyse interne du broyeur	135
Figure IV.23 : choix de points de prélèvements	142
Figure IV.24 : niveau matière/boulets pour compartiment 1	145
Figure IV.25 : niveau matière/boulets pour compartiment 2	145
Figure IV.26 : état de blindages pour compartiment 1	146
Figure IV.27 : état de blindages compartiment 2	146
Figure IV.28 : matage des lumières	147
Figure IV.29 : releveurs de la cloison intermédiaire	147
Figure IV.30 : colmatage et plaques cassées de la cloison de sortie	148
Figure IV.31 : courbe de l'évolution de la granulométrie dans le compartiment 1	149
Figure IV.32 : comparaison entre les types de clinker.....	150
Figure IV.33 : répartition actuelle des boulets dans le compartiment 1	150
Figure IV.34 : courbe de l'évolution de la granulométrie dans le compartiment	152

Figure IV.35 : répartition actuelle des boulets dans le compartiment 2	152
Figure IV.36 : courbe de la granulométrie du clinker produit	154
Figure IV.37 : la répartition proposée des boulets en % massique	155

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
الملخص	v
Table des matières	vi
Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xvi
Introduction générale.....	xviii
1. Problématique de la thèse	xx
2. Objectifs de la thèse	xxi
3. Méthodologie suivie	xxi
CHAPITRE I : la fonction maintenance Revue Bibliographique.	

1. Introduction du chapitre.....	2
2. La fonction maintenance	2
2.1. Concepts et définitions	2
2.1.1. Définitions de la fonction maintenance	2
2.1.2. Maintenabilité et critères de maintenabilité	2
2.1.3. Niveaux de maintenance	3
2.2. Interaction de la maintenance et de la production	5
2.3. Diversité des activités composant les interventions de maintenance	5
3. Politiques de maintenance	6
3.1. Mise en œuvre d'une politique de maintenance	7
3.1.1. Maintenance corrective	8
3.1.2. Maintenance préventive	10
3.2. Les opérations de maintenance	11
3.2.1. Les opérations de la maintenance corrective	12
3.2.2. Les opérations de la maintenance préventive	13
3.2.3. Autres opérations du service maintenance	13
3.3.Évolution de la maintenance	14

4. Management d'une entreprise	16
4.1. Approche systémique d'une entreprise	16
4.2. La maintenance dans la conduite d'une entreprise	17
4.3. La maintenance est un secteur en mutation	19
5. Les politiques de maintenance	21
5.1. La maintenance de type âge	21
5.2. La maintenance de type blocs	22
5.3. Les stratégies de maintenance basées sur la limitation du taux de défaillance	23
5.4. Les stratégies de maintenance de type séquentiel	23
5.5. Les stratégies de maintenance basées sur la limitation du coût (de la durée) des actions de maintenance	23
5.6. Les stratégies de maintenance basées sur la limitation du nombre des réparations effectuées	23
5.7. Stratégies d'inspection	24
6. Conclusion.....	26

CHAPITRE II : La relation entre la fonction maintenance et la fonction production.

Introduction du chapitre	27
2. Le système de production au service de la performance	27
2.1. Définition de la fonction production	27
2.2. La typologie des systèmes de production	28
2.3. La performance	29
2.4. La sûreté de fonctionnement	29
2.5. Objectifs de la fonction production	29
3. Organisation de la production	30
3.1. La méthode de 5 zéros	31
3.2. La méthode du juste-à-temps	32
4. Modèle conceptuel d'un système de production	33
4.1. Dégradation des systèmes de production	34
4.1.1. Défaillance des systèmes de production	34
4.1.2. Classification des défaillances par type	36
4.1.3. Classification des défaillances par cause	38
4.1.4. Classification des défaillances par impact sur l'état du système (mode de défaillance)	39

5. La maintenance intégrée à la production	39
5.1. Stratégies de maintenance intégrée	39
5.2. Intégration maintenance et production	40
5.3. Planification de production et maintenance	40
5.4. Modèles d'intégration Maintenance production	43
5.4.1. Modèle de conception et conceptuel de processus	45
5.4.2. Modèle de La quantité économique à produire avec pannes	46
5.4.3. Modèle de détérioration du système de production avec capacité du stock tampon	48
5.4.4. Modèle d'optimisation des taux de production et de la maintenance	49
6. Conclusion	49

CHAPITRE III : L'optimisation de la maintenance préventive.

1. Introduction	51
2. État de l'art sur l'optimisation de la maintenance préventive.	51
3. Conclusion.....	56.
4. Comparaison entre la maintenance corrective et celle préventive	57
4.1. Maintenance corrective	58
4.2. Maintenance préventive	58
4.2. Maintenance prédictive	59
5. Choix de la politique de maintenance	61
6. Objectifs visés par la maintenance préventive	62
6.1 Mise en œuvre d'une maintenance préventive	63
7. Optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité (M.B.F)	66
7.1. État de l'art de la maintenance basée sur la fiabilité	66
7.2. Différentes approches de la MBF	66
7.3. Etudes basée sur l'optimisation de la maintenance par la fiabilité OMF	69
7.4. Présentation de la méthode	70
7.5. Optimisation de la phase 3 (l'analyse des défaillances des matériels critiques) de OMF	72
7.5.1. Modèles de gestion de la maintenance	72
7.5.2. Le modèle proposé de la gestion de maintenance	73
7.5.2.1. Étape 1: identification du problème	74
7.5.2.2. Étape 2: évaluation des composants critiques	75

7.5.2.3. Étape 3: décision de maintenance	75
7.5.3. L'évaluation des stratégies de maintenance OMF	75
7.5.4. Retour d'expérience pour l'OMF	76
7.5.5. L'impact d'une politique de maintenance	76
8. Choix entre le préventif et le correctif	78
8.1. Modèle analytique de maintenance	78
8.2. Méthodologie de sélection de la stratégie de maintenance appropriée	79
9. conclusion	78
10. Maintenance Productive Totale (TPM).....	83
10.1. Généralités	83
10.2. Les démarches de la TPM	84
10.2.1. La Phase d'analyse	84
10.2.2. La phase d'amélioration	85
10.2.2.1. Les 5 principes	86
10.2.2.2. Les piliers de la TPM	87
10.3. Le calcul du Taux de Rendement Global : TRG ou le Taux de Rendement Synthétique (TRS).....	88
8.3.1. Définition	88
10.4. L'implantation de la TPM	89
11. Conclusion	91
CHAPITRE IV : Etudes de cas effectué.	
<hr/>	
1. Introduction du chapitre	92
Etude de cas N°1 : au sein d'une société d'exploitation minière	92
2. Introduction	92
3. Présentation des engins de fond	93
3.1. Présentation du TORO	93
3.1.1. Moteur	94
3.1.2. Transmission	95
3.1.3. Direction	96
3.1.4. Système hydraulique du godet de pelle	96
3.1.5. Le système de freinage	97
3.2. Présentation du JUMBO	97

3.2.1. Caractéristiques techniques	98
3.2.2. Marteau	99
3.2.3. Glissière	99
1-3- Le bras du marteau	100
3.2.4. Les vérins	100
3.2.5. Boom	100
3.2.6. Positionnement Bras	101
4. Analyse Pareto des équipements	101
4.1. Déterminer l'engin TORO le plus critique	102
4.1.1. La méthode Pareto en type d'organe pour le TORO	102
4.1.2. Calcul du ratio RD	103
4.2. La méthode Pareto en type d'organe pour le JUMBO	104
4.2.1. Analyse du Pareto en type nombre d'arrêt d'organe de l'engin JUMBO	104
4.2.2. Calcul du ratio RD	105
5. indicateurs nécessaires au suivi du plan de maintenance préventive	106
5.1. Taux de rendement synthétique (TRS)	107
5.1.1. Définition	107
6. réalisation d'un tableau de bord pour le service de la maintenant	109
6.1. Calcul des indicateurs de tableau de bord	109
6.1.1. Indice de fiabilité : MTBF	109
6.1.2. Indice de maintenabilité : MTTR	109
6.1.3. Taux de disponibilité Matériel	109
6.1.4. Taux de rendement économique	110
8. Le tableau de bord proposé pour le service de la maintenance	111
8. Calcul de MTBF	114
8.1. MTBF pour le TORO N°7	114
8.2.- MTBF pour le JUMBO N°5	114
9. Solutions proposées	114
10. Conclusion de l'étude du cas N°1	116
Etude du cas N°2 : au sein d'une cimenterie	117
1. Introduction	117
2. Le broyeur à boulet	117

3. Problématique	119
4. Diagnostic des causes de chutes de débit du broyeur	120
4.1. Diagramme de causes à effet	120
4.1.1. Arbre des causes	120
4.1.2 Analyse des résultats	123
5. Analyse de modes de défaillance du broyeur	125
5.1. Introduction à l'analyse fonctionnelle	125
5.2 Enoncé du besoin	126
5.3 Principe de l'analyse fonctionnelle (APTE)	128
5.4 Architecture du système	128
5.2. Préparation de l'analyse des défaillances de leurs effets et leur Criticité (AMDEC) .	128
5.2.1 Constitution du groupe de travail	129
5.2.2 Préparation de documents des fiches AMDEC	129
5.2.3 Barème de cotation	130
5.3. Réalisation de l'AMDEC du broyeur	131
5.3.1 Description du broyeur	131
5.3.2 Caractéristiques techniques	132
5.3.3 Analyse externe	132
5.3.4 Analyse interne	134
5.3.5 Les plans d'actions	138
6. Inspection interne du broyeur	141
6.1. Introduction	141
6.2. Méthodes d'analyses de la matière	141
6.2.1 Niveaux de matière	141
6.2.2 Échantillonnage	142
7. Vérification des éléments internes du broyeur	143
7.1 Dimensions caractéristiques	143
7.2 Blindages	143
7.3 Cloisons et fonds d'entrée et de sortie	144
7.4 La charge broyante	144
8. Résultats et interprétations	144
8.1 Niveau de matière/boulets	144
8.2 Etats des éléments internes du broyeur	145

8.3 Analyse des résultats des prélèvements de matière	148
8.4 Proposition de la charge broyante	153
9. Conclusion de l'étude de cas N°2	156
10. Conclusion du chapitre	156
Conclusion générale	157
Bibliographie	160
Les annexes	171

CHAPITRE I

La Fonction Maintenance : Revue Bibliographique.

1. Introduction du chapitre

La maintenance industrielle est devenue une fonction critique et inéluctable pour le survie d'une entreprise. Cette fonction a la lourde tâche de garantir la disponibilité et le bon fonctionnement des systèmes de production. Dans ce chapitre, nous présentons quelques définitions et notions de base sur la fonction de maintenance qui constitue le domaine applicatif de nos travaux. Nous abordons les évolutions de cette fonction clé des entreprises suite aux évolutions technologiques et nous classons les travaux selon des objectifs.

2. la fonction maintenance

2.1. Concepts et définitions

2.1.1. Définitions de la fonction maintenance

D'après le [Robert (2004) (1)], la maintenance regroupe "l'ensemble de tout ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement".

Face à cette première définition, la norme [AFNOR NF EN 13306 (2001)(2)] offre une vision plus précise de la maintenance en indiquant que la maintenance intègre l'ensemble des activités techniques, administratives ou de management qui ont pour but de "maintenir ou de rétablir un équipement dans un état ou des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise".

Une activité de maintenance est souvent liée à une défaillance d'un bien.

Un bien est défini dans la norme Norme [AFNOR NF EN 13306(2001) (3)] comme "tout élément, composant, mécanisme, sous-système, unité fonctionnelle, équipement ou système qui peut être considéré individuellement" ; une défaillance y est définie aussi comme "l'altération ou la cessation de la capacité d'un bien à accomplir une fonction requise".

2.1.2. Maintenabilité et critères de maintenabilité

La maintenabilité est un des attributs de la sûreté de fonctionnement, comme la fiabilité, la disponibilité et la sécurité [Laprie J.C et al. (1995) (4)], Nous nous intéressons plus particulièrement aux notions de maintenabilité et de disponibilité, les autres grandeurs restant néanmoins importantes sans être au centre de nos intérêts. D'après la norme Norme [AFNOR X 60-500 (1988) (5)], la maintenabilité d'un système traduit son aptitude à "être

maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il puisse accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions d'utilisation données avec des moyens et procédures prescrits". La norme [AFNOR NF EN 13306 (2001) (6)] associe le terme de disponibilité à l'aptitude d'un système "à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation données pendant une période donnée". Plusieurs critères comme le MTBF (Mean Time Between Failure), MTTR (Mean Time To Repair),... permettent de caractériser en termes de sûreté de fonctionnement le fonctionnement des biens maintenus.

En liaison avec cette définition de la maintenabilité, des travaux ont abordé la notion de critères de maintenabilité [Kaffel H et al. (2003) (7)] qu'on retrouve dans la norme [AFNOR X 60-301 (1982) (8)]. Ces critères sont au nombre de cinq :

- la surveillance en maintenance préventive et l'accessibilité des composants,
- les différents temps de la maintenance corrective, en matière de recherche de panne, de défaillance ou encore de diagnostic,
- l'organisation de la maintenance, avec la périodicité des interventions préventives, la présence d'indicateurs, la complexité des interventions,...
- la qualité des ressources immatérielles aidant à l'intervention,
- le suivi de l'équipement par le fabricant.

Parmi ces critères importants, nous nous intéresserons principalement dans notre travail au quatrième dédié à la qualité des ressources immatérielles impliquées dans la réalisation de l'intervention.

2.1.3. Niveaux de maintenance

La norme [AFNOR X 60-000 (2002) (9)] propose un classement des actions de maintenance en cinq niveaux de complexité (Tableau I.1).

Niveaux	Détails par niveau des actions selon la norme AFNOR	Définition simplifiées
niveau 1	Intervention de réglage simple, prévu par le constructeur. Remplacement de consommables. Echange d'équipement accessible en toute sécurité. Reprise légère (de peinture)	action s'effectuant sur le matériel
niveau 2	Dépannage par échange standard	

	Contrôle de bon fonctionnement Intervention mineure de maintenance préventive Concept du LRU (Lowest Replaceable Unit) : matériel à maintenir en urgence.	
niveau 3	Intervention hors matériel réalisée dans l'atelier ordinaire Identification et diagnostic de pannes Réparation par échange de composants fonctionnels Réparation mécanique mineure Programmation d'éléments simples Concept du SRU (single Replaceable unit) : élément interchangeable d'une unité.	Action s'effectuant en dehors du matériel
Niveau 4	Intervention de type spécialisé Réglage d'instruments de mesure Vérification d'étalons Travaux importants de maintenance corrective ou préventive	
Niveau 5	Travaux important de rénovation ou la reconstruction Retour en usine ou en atelier de maintenance Intervention de grande maintenance Remise à neuf	Intervention de grande maintenance

Tableau I.1. Classification des actions de maintenance

Dans nos travaux, nous nous intéressons aux besoins des interventions en ressources et, plus particulièrement, en ressources immatérielles. Il nous a donc paru intéressant d'associer des ressources à chaque niveau de maintenance et de compléter cette décomposition par niveau de complexité des actions de maintenance, comme le proposent de [Monchy F et al. (2003)(10)] et de [Mechin B et al. (2007)(11)], Une synthèse de l'affectation de ces ressources est présentée dans le Tableau I.2.

Niveau	Personnels d'intervention	Moyens	documents
Niveau 1	Exploitation sur place (opérateur, régleur,....)	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation Consommables	Procédures d'auto-maintenance Procédures d'assurance qualité
Niveau 2	Technicien ou exploitant habilité sur place (régleur, chef de ligne....)	Outillage léger Pièces de rechange à proximité, sans délai	Procédures détaillées Instruction de maintenance
Niveau 3	Technicien de maintenance qualifié, sur place ou en local de maintenance	Outillage prévu Appareils de mesures, d'essai et de contrôle	Procédures détaillées Dossier machines
Niveau 4	Equipe de techniciens spécialisés, en atelier central Société spécialisée.	Outillage spécialisé Matériel d'essai, contrôle Pièces de rechange et sous-	Dossier machines Documents spécifiques

		ensembles	Documents de préparation
Niveau 5	Constructeur de matériel Société spécialisé	Moyen logistiques proches de la fabrication par le constructeur	Documentation constructeur (spécifique)

Tableau I.2. Ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance

Cette affectation des ressources en fonction des niveaux ayant des seuils variables ne permet qu'une spécification globale mais elle met néanmoins en évidence les besoins en ressources humaines et matérielles, en pièces de rechange et en documents correspondant à chaque niveau de maintenance.

Nous constatons également un besoin en ressources de plus en plus spécialisées avec l'augmentation du niveau de maintenance.

2.2. Interaction de la maintenance et de la production

Au sein d'une entreprise, plusieurs fonctions coexistent dans l'objectif de produire des biens ou des services. La fonction maintenance intervient en support du processus de production de l'entreprise, en maintenant les moyens de production et les infrastructures [Maillet P et al. (2005) (12)].

La maintenance a une position transversale dans l'entreprise puisqu'elle ne contribue pas directement à la production mais est un processus très sensible pour l'entreprise. Cette position transversale la conduit à avoir une relation étroite avec la production avec laquelle des conflits peuvent survenir lors de l'organisation des activités de maintenance par rapport à celles de production.

2.3. Diversité des activités composant les interventions de maintenance

Les interventions de maintenance font appel à des activités de diverses natures qui conduisent à la remise en fonctionnement de l'équipement [Pérès F et al. (2006) (13)]. La succession d'étapes qui composent une intervention peuvent être : la détection, le diagnostic, la réparation et le redémarrage de l'équipement. Entre ces étapes, des temps d'attente de disponibilité de ressources, de pièces de rechange,... peuvent s'intercaler.

La détection marque le début de l'intervention, déclenchée par l'occurrence d'un évènement : défaillance en cas d'intervention corrective ou donnée calendaire en cas d'intervention préventive ; l'alerte est ensuite donnée en cas de maintenance corrective. L'étape de diagnostic consiste, à partir des constats effectués sur l'équipement, à formuler l'origine de la défaillance et à proposer la réparation qui semble la plus adaptée. La réparation va correspondre au changement du composant défectueux, à un réglage,... et se poursuit par des tests de conformité de l'intervention et la remise en fonctionnement de l'équipement.

Dans nos travaux, nous nous intéressons, à la relation entre la stratégie de la fonction maintenance, nous avons donné un intérêt particulier à l'amélioration de la méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité (OMF) ainsi que la méthode Total Productive Maintenance (TPM).

Le processus fonctionnel de maintenance peut être décrit plus en détail dans son organisation, comme nous le montre la Figure I.1 [G. Zwingelstein et al. (1996) (14)].

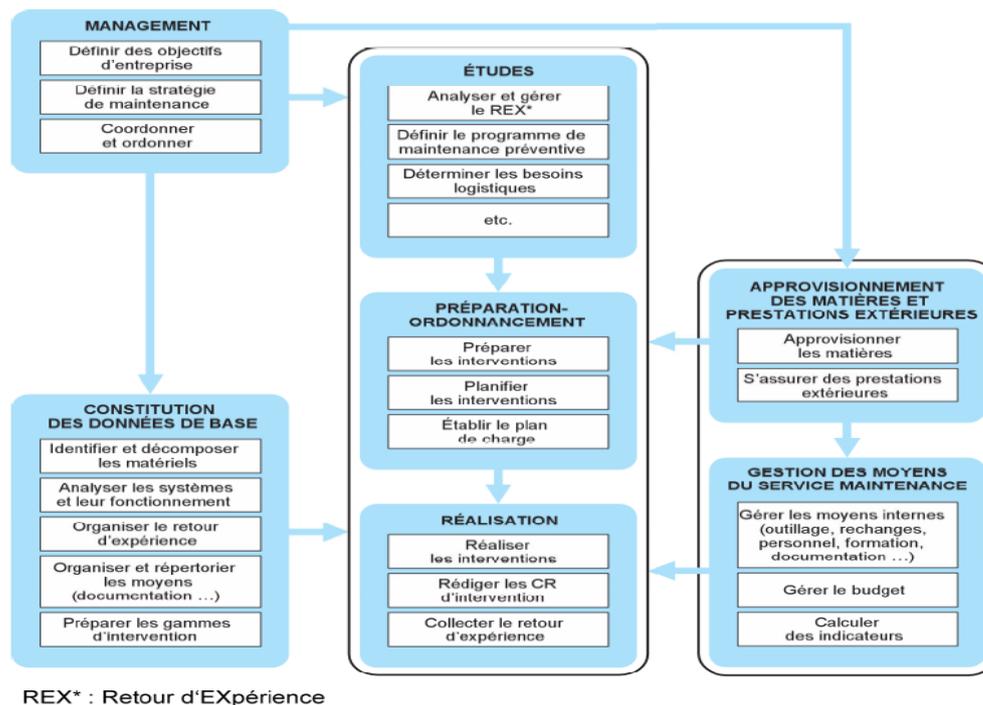


Figure I.1 : Décomposition fonctionnelle de la maintenance

3. Politiques de maintenance

Dans un contexte économique en constante évolution, et caractérisé par un développement de la concurrence et de la course à la compétitivité, qui entraîne la recherche

de la qualité totale et surtout réduction des coûts, au fur et à mesure de l'automatisation des processus de production, la maintenance dont la vocation était d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, la mise en place d'une politique de maintenance est devenue une fonction stratégique de l'entreprise.

Par définition, la maintenance vise “ toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sureté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management” selon la norme [AFNOR (1988) (15)]. Au sein du service de maintenance, on distingue globalement deux politiques de maintenance : la maintenance corrective et la maintenance préventive. Toutefois, quand une tâche de maintenance préventive est réalisée sur un équipement suite à la défaillance d'un autre équipement, on parle de la maintenance mixte ou d'opportuniste. La définition de chacune de ces politiques est donnée ci-dessous.

Le principal objectif de la maintenance est d'assurer la pérennité des systèmes de production, de diminuer les pannes imprévues, garantir la qualité exigée par les clients et de réduire les coûts de révision et de remise en état de fonctionnement. Nous pouvons synthétiser les missions de la maintenance en les plaçant sur trois plans interdépendants [Monchy,et al. (2000) (16)] :

Sur le plan technique :

- Accroître la durée de vie des équipements
- Améliorer la disponibilité

Sur le plan économique :

- Réduire les prix de revient en minimisant les coûts des défaillances
- Réduire le coût global de possession des équipements

Sur le plan social :

- Réduire le nombre d'événements imprévus, ce qui réduit le risque d'accidents.
- Améliorer la qualité du travail.

3.1. Mise en œuvre d'une politique de maintenance

Dans la définition de la maintenance, nous trouvons deux mots-clés :

- Maintenir et rétablir. La norme [EN 13306 (2001) (17)] « Terminologie de la maintenance » définit les différentes classes en maintenance. Ce paragraphe fera l'objet d'une large présentation concernant ces différentes classes.
- Le premier fait référence à une action préventive, le deuxième fait référence à l'aspect correctif. On peut résumer les différentes politiques de maintenance selon la Figure I.3. Une bonne synthèse de ces différentes stratégies de maintenance se trouve par exemple dans la thèse de [Castanier B. (2002) (18)] et l'article de [Despujols A et al. (2004) (19)]. Le choix d'une politique est parfois imposé, Ainsi, l'optimisation de la maintenance par la fiabilité détermine la maintenance préventive optimale. Dans le cas où il n'y a pas de maintenance préventive, cela revient à attendre la défaillance, c'est-à-dire une maintenance corrective. De nombreuses études ont montré que les politiques de la maintenance préventive (ou plutôt mixte) sont souvent les moins onéreuses sur le long terme [Caputo A.C et al. (2009) (20)] présentent l'influence d'une mise en œuvre d'une politique de maintenance préventive sur les performances des systèmes de fabrication.

3.1.1. Maintenance corrective

Elle regroupe les différentes opérations effectuées après l'apparition d'une défaillance sur un équipement donné. Ces opérations comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification et le contrôle du bon fonctionnement. Il est à souligner que les activités de maintenance corrective sont subies et découlent directement des conséquences de l'apparition d'une défaillance. Ces activités englobent deux types d'interventions :

– Les interventions palliatives qui remettent l'équipement en état de fonctionnement provisoirement. Cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère temporaire qui devront être suivies d'actions curatives.

– Les interventions dites curatives, qui réparent les équipements d'une manière définitive. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou des remplacements ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances.

C'est un choix politique de l'entreprise qui malgré tout, nécessite la mise en place d'un certain nombre de méthodes qui permettent d'en diminuer les conséquences :

- Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (exemple :
- AMDEC [Kaffel H et al. (2003) (7)] (méthode permettant de mettre en évidence de façon prospective un certain nombre d'organes ou de machines critiques pour la sécurité ou la fiabilité d'un système après inventaire des défaillances élémentaires possibles)).
- Installation des éléments de secours (redondance du matériels).
- Utilisation des technologies plus fiables.
- Recherche des méthodes de surveillance les mieux adaptées aux points névralgiques (mouchards, capteurs intégrés, ...).
- Utilisation des méthodes de diagnostic de pannes (arbre des causes de défaillances, historique des pannes, ...).

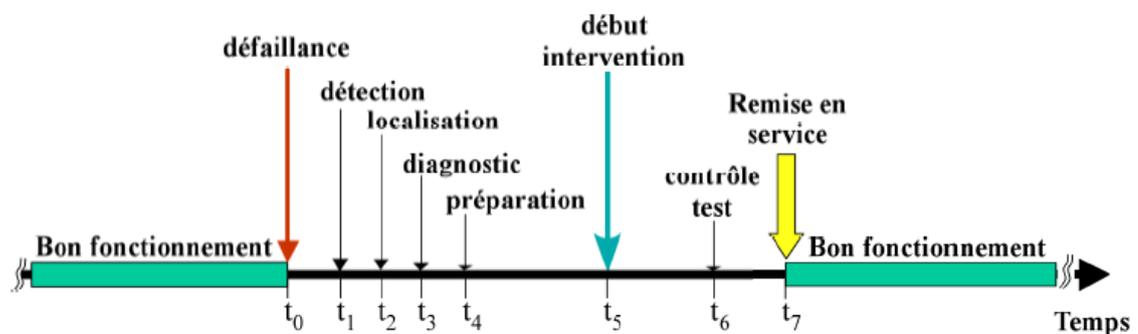


Figure I.2 : Processus de déroulement d'une maintenance corrective sur un système ou un équipement

On peut remarquer que depuis l'instant t_0 jusqu'à l'instant t_5 , aucune intervention opérationnelle n'est encore engagée. Cette durée (t_5-t_0) devra être minimisée pour améliorer la productivité. Elle pourra être diminuée par une gestion efficace d'une maintenance dite corrective et une analyse de retour d'expérience dans le programme de maintenance. Ce type de maintenance sera réservé à du matériel peu coûteux, non stratégique pour la production, et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité ou le processus de fabrication.

3.1.2. Maintenance préventive

Cette maintenance a pour objet d'éviter la dégradation de l'équipement et par conséquent réduire la probabilité d'occurrence d'une défaillance. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé de pièces usinées (maintenance systématique) ou à partir de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation de l'équipement (maintenance conditionnelle). On trouve aussi une maintenance dite de ronde qui se caractérise par une surveillance régulière de l'équipement sous forme de visite à fréquence élevée, entraînant si nécessaire des travaux mineurs d'entretien. Sommairement, on distingue :

- Maintenance systématique : correspond à l'ensemble des actions destinées à restaurer, totalement ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants. Elle comprend le remplacement systématique de certains composants critiques en limite d'expiration de leur durée de vie, le remplacement de composants peu coûteux pour éviter les dépenses d'évaluation de leur état et l'essentiel des opérations de service (remplacement des filtres, du fluide, ...). Remarquons que ce type de maintenance est appliqué sur des composants dont on connaît de façon précise la durée de vie moyenne ou lorsque des contraintes réglementaires (souvent liées à la sécurité) sont obligatoires.

- Maintenance conditionnelle : elle est effectuée sur la base de critères d'acceptation préétablis, suite à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs. Elle admet toutefois que l'équipement puisse continuer à fonctionner, tant que celles-ci n'ont pas atteint les limites spécifiées. En revanche, ce type de maintenance requiert des tâches additionnelles pour évaluer le niveau de dégradation de l'équipement et entamer ensuite les interventions nécessaires.

- Maintenance prédictive : ce type de maintenance est subordonné à l'analyse de l'évolution surveillée de la dégradation de l'équipement (par exemple autodiagnostic, information d'un capteur). Elle permet ainsi d'optimiser en retardant ou en avançant la planification des interventions.

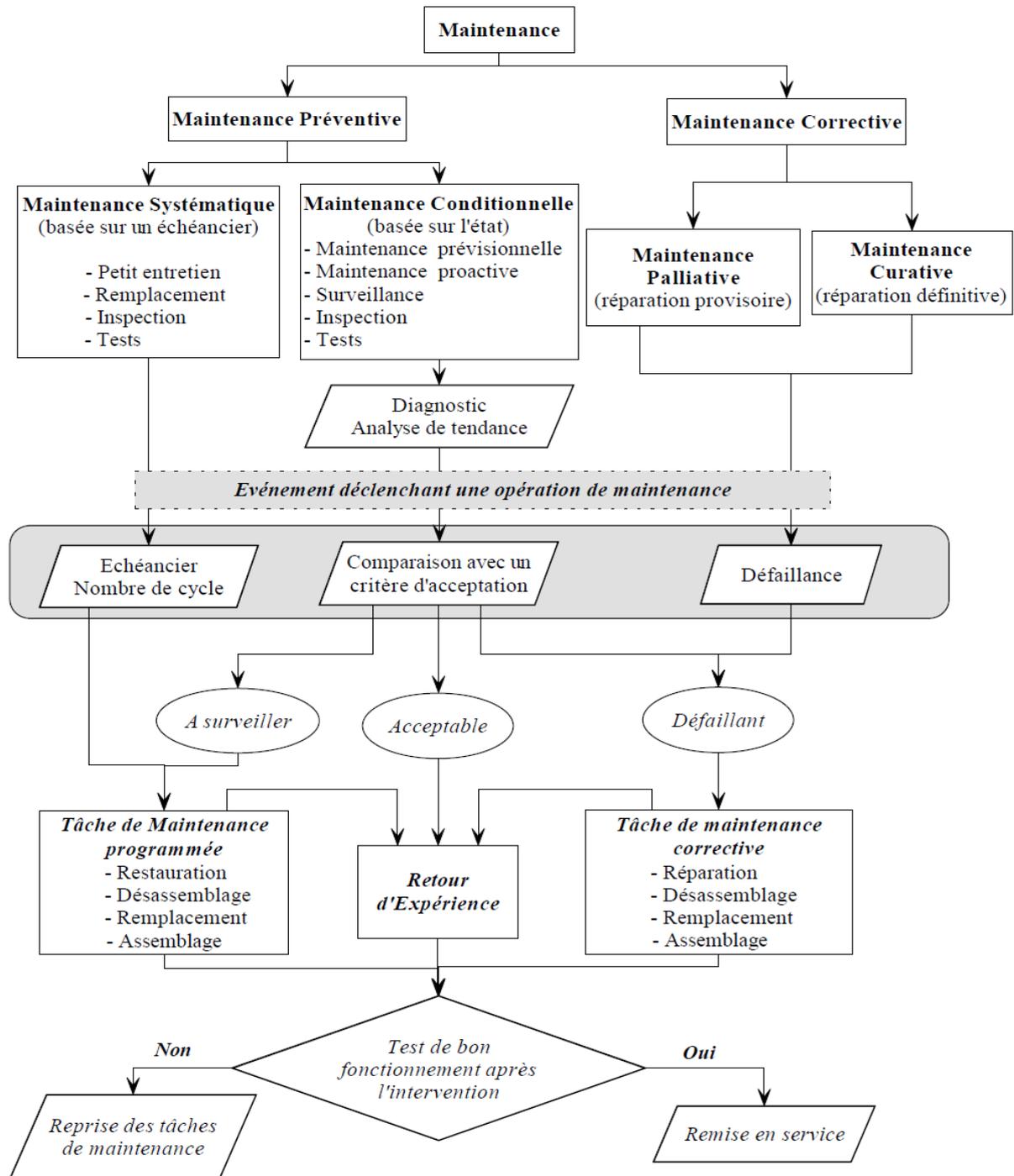


Figure I.3 – Diagramme des différents concepts de maintenance

3.2. Les opérations de maintenance

3.2.1. Les opérations de la maintenance corrective

Dans le cas de la maintenance corrective (curative) il s'agit d'utiliser les opérations suivantes :

• La rénovation :

Inspection complète de tous les organes, reprise complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défectueux, conservation des bonnes pièces.

La rénovation apparaît donc comme l'une des suites possibles d'une révision générale au sens strict de sa définition.

• La réparation :

C'est une intervention définitive et limitée de maintenance corrective après défaillance.

L'application de la réparation, opération de maintenance corrective, peut être décidée, soit immédiatement à la suite d'un incident, ou d'une défaillance, soit après dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle, ou systématique. Tous les équipements sont concernés par cette opération.

• Le dépannage :

C'est une action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement.

Compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

Le dépannage, opération de maintenance corrective, n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette connaissance permet souvent de gagner du temps. Souvent les interventions de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses.

Ainsi le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou, intervention à l'arrêt.

3.2.2. Les opérations de la maintenance préventive

Les opérations suivantes sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

• **L'inspection :**

C'est une activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie.

Elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies.

Cette activité peut s'exercer notamment au moyen de ronde.

• **Le contrôle :**

C'est une vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Le contrôle peut :

- comporter une activité d'information ;
- inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement ;
- déboucher sur des actions correctives.

• **La visite :**

Activité consistant en un examen détaillé et prédétermine de tous ou une partie des équipements. Elle peut entraîner certains démontages et déclencher des opérations correctives des anomalies constatées. Ce sont des opérations de surveillance qui dans le cadre de la maintenance préventive systématique s'opèrent selon une périodicité prédéterminée.

3.2.3. Autres opérations du service maintenance

• **La révision :**

C'est l'ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné. Il est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles des révisions générales.

• **Amélioration :**

Elle consiste à procéder à des modifications, des changements ou des transformations sur un matériel correspondant à la maintenance.

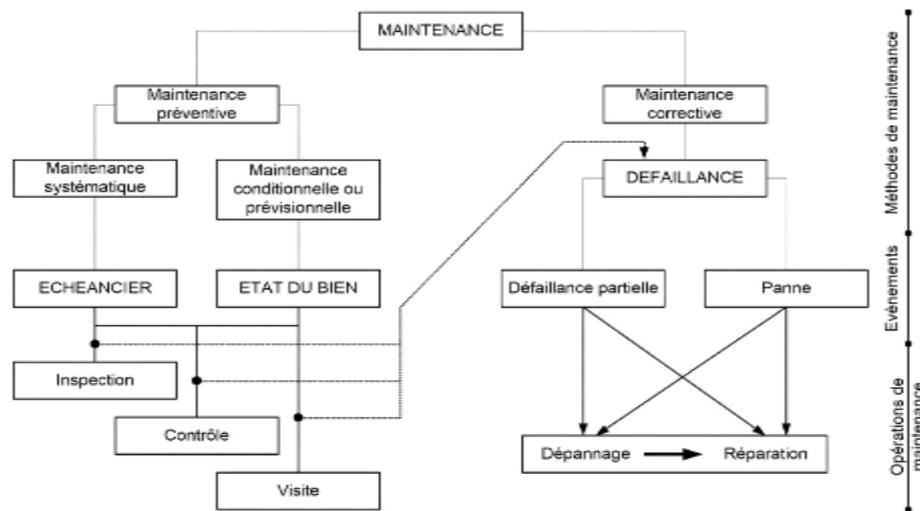


Figure I.4 : Les diverses options de la maintenance.

3.3.Évolution de la maintenance

Avant la révolution industrielle, la maintenance consistait en des activités des artisans (menuisier, forgeron, soudeur, maçons, etc.) dans la réparation des bâtiments, des machines primitives, et des moyens de transport de l'époque. Comme il n'y avait pas la notion de pièces de rechange, toute pièce défaillante était soit réparée, soit remplacée par une nouvelle pièce fabriquée. Par ailleurs, la réparation était à l'ordre du jour et les structures de base étaient-elles mêmes soit réparables, soit d'une grande durabilité, ou les deux à la fois. En l'absence de méthodes pour le calcul de la fatigue et autres concepts liés à la dégradation, la conception et la réparation étaient fortement intégrées. En effet, pour remplacer une pièce défaillante jugée partiellement efficace par le propriétaire, ce dernier exigeait une autre pièce plus fiable. Toutes ces pratiques étaient liées à l'évolution lente et au faible coût de ces services de l'époque. Ces pratiques ont progressivement évolué à partir de la révolution industrielle [Sherwin, D et al. (2000) (21)]. Le concept, lent à l'époque, de pièces de rechange, s'est progressivement accéléré. Cette accélération est fortement accentuée par la complexité croissante des systèmes de production. Le travail de l'agent de maintenance s'est alors progressivement dirigé vers de plus larges aptitudes au diagnostic. Un autre facteur important de ce changement était le contrôle de la qualité des produits et/ou des services. Récemment, l'automatisation dans les systèmes manufacturiers a rendu le remplacement des pièces ou des

unités entières plus rapide et plus facile que les réparations dans la plupart des cas [Adzakpa, K.P.(2004) (22)]. Les approches pour la gestion de maintenance ont considérablement évolué au cours du vingtième siècle.

Jusqu'en 1940, seule la maintenance corrective était pratiquée et dont le coût était supposé comme un coût inévitable. La maintenance corrective est la maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise [Dekker, R et al. (1996) (23)]. À l'époque, les agents de maintenance n'avaient comme objectif que la remise en état des systèmes de production en cas de panne. La maintenance n'était pas envisagée à la conception, et ses impacts sur les performances des systèmes n'étaient pas connus. La maintenance préventive est apparue dans l'industrie militaire pendant la deuxième guerre mondiale. La maintenance préventive est la « maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et elle est destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien [Dekker, R. (1996)(24)]. Une large pratique de la maintenance préventive était connue par les Allemands qui ont fortement poussé à l'exigence de plus en plus de fiabilité. Ils ont accordé une importance stratégique à la maintenance [Adzakpa, K.P. (2004) (25)]. La maintenance périodique était initialement destinée à améliorer la sûreté plutôt qu'à accroître la disponibilité ou à réduire les coûts.

Depuis 1950, les modèles des stratégies de maintenance sont apparus de façon croissante. Cette évolution peut être observée à travers de nombreux travaux publiés sur la maintenance et qui sont regroupés et analysés dans plusieurs travaux de synthèse et états de l'art tels que [Chelbi, A et al (2009)(26)] ; [Dekker, R et al. (1996) (27)] ; [Scarf et al. (1997) (28)] ; [Sharma, A et al. (2011) (29)] ; [Laugier, A et al. (1996) (30)] Ces différents travaux présentent des modèles de différentes stratégies de maintenance ainsi que la sélection optimale des paramètres de ces stratégies. Depuis 1970, l'impact réel des actions de maintenance sur la performance des systèmes de production était abordé. Des approches intégrées de la maintenance ont évolué aussi bien dans le domaine public que privé. Il apparut de plus en plus que la maintenance ne devrait pas qu'être vue dans un contexte opérationnel en considérant les défaillances des équipements et leurs conséquences. Elle devait tenir compte aussi bien des retombées économiques que des normes nationales et internationales de plus en plus exigeantes. Ainsi, l'évolution de la maintenance et des outils pour son management ont donné à la maintenance diverses pratiques au sein de l'entreprise [Adzakpa,

K.P. (2004) [31]. Avec l'évolution importante de la technologie lors des dernières décennies, la télémaintenance a pris une place particulière dans les industries manufacturières Laugier, A et al. (1996) (32)]. Ce concept permet de faire le contrôle et le suivi de l'évolution de l'état des systèmes de production. L'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations (Figure I.5).

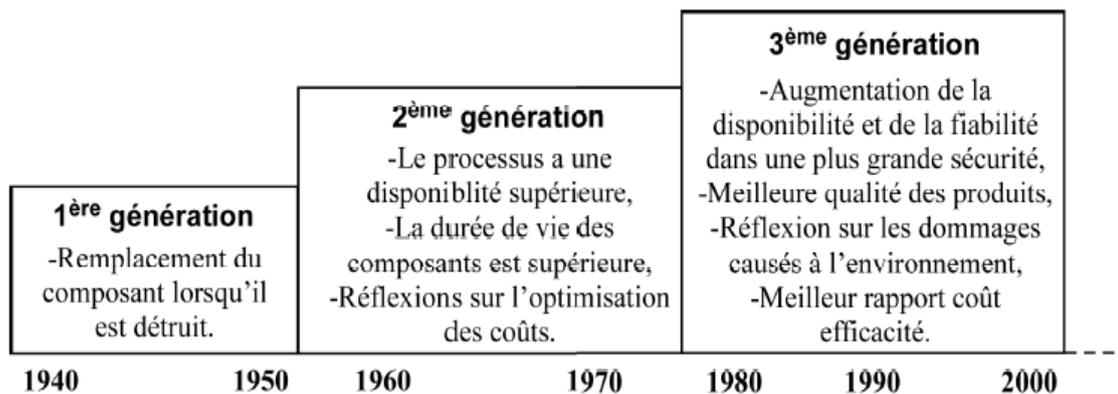


Figure I.5 : Evolution de la maintenance depuis 1940

4. Management d'une entreprise

Nous évoquons dans ce paragraphe les différentes fonctionnalités existant dans une entreprise en général, et en particulier le rôle de la maintenance dans la conduite de l'entreprise et son implication dans le coût de possession des machines de production.

4.1. Approche systémique d'une entreprise

L'approche systémique d'une entreprise consiste à identifier et à modéliser toutes les interactions entre l'outil technique de production et des facteurs internes ou externes de l'entreprise tels que la conception, la qualité, le management, la maintenance, l'évolution et l'émergence des nouvelles technologies, les facteurs humains et sociaux ainsi que l'environnement économique mondial. L'approche systémique, si elle est bien maîtrisée, permet aux industriels de mieux gérer leurs projets, en termes de coût, de délai de réalisation mais également en terme de valeur d'usage la mieux appropriée à la demande du marché.

En effet, l'objectif de tout processus industriel est de satisfaire les consommateurs d'un produit fabriqué, et l'atteinte de cet objectif avec les coûts engendrés est d déterminante

dans la compétition à laquelle l'industriel est nécessairement confronté. De ce fait, la maintenance participe à cette finalité qui englobe à la fois la satisfaction du consommateur et l'amélioration du profil de l'entreprise. Elle est considérée comme un levier permettant d'assurer des gains de productivité sans être vue uniquement comme un poste inévitable de dépenses - durant la durée du cycle de vie d'un produit. D'où l'importance d'avoir un système de maintenance qui réponde au mieux aux exigences de l'entreprise et qui permette d'améliorer au mieux son profil. Ce système de maintenance doit être en parfaite cohérence avec les autres fonctionnalités de l'entreprise, pour que chaque décision vis-à-vis du déroulement des tâches de production et de maintenance soit prise dans une optique de la bonne conduite du système de production [Léger J.B. (1999) (33)].

4.2. La maintenance dans la conduite d'une entreprise

La conduite d'un système de production en général est une tâche complexe du fait que deux difficultés majeures s'imposent continuellement. La première difficulté est liée à la complexité du problème d'ordonnancement pour la recherche d'une solution optimale vis-à-vis d'un critère donné, sans pour autant enfreindre les contraintes techniques de fonctionnement du système de production et en satisfaisant les objectifs fixés. La deuxième difficulté correspond à la nécessité de trouver un ordonnancement optimal dans un contexte perturbé, qui provient du fait d'intégrer deux activités complexes et fortement liées, à savoir la production et la maintenance, et qui n'ont pas toujours les mêmes règles de priorité. En effet, la production raisonne en termes de productivité et délai, et la maintenance raisonne en termes de coût et d'efficacité. Ceci pose un problème d'interprétation et de prise de décision par rapport aux événements ou tâches qui surviennent. D'où la nécessité de coordonner les différentes fonctionnalités qui interagissent dans la conduite du système de production. La figure I.6 schématise les principales fonctionnalités qui sont : la surveillance du système de production en temps réel, la planification et l'ordonnancement des différentes tâches, la supervision permettant le contrôle du système, la commande qui fait exécuter des opérations spécifiques selon l'état du système et enfin la maintenance qui assure la durabilité du service de production. Nous décrivons sommairement le rôle de chaque fonctionnalité en soulignant le lien avec le service de maintenance.

a) Surveillance : La surveillance est chargée de recueillir en permanence tous les signaux, via des indicateurs, provenant du système de production, et de suivre en temps réel

les évolutions du système commandé. Elle regroupe ainsi l'ensemble des outils permettant de contrôler l'évolution du comportement du système par rapport à son fonctionnement normal, et de détecter toute anomalie ou défaillance. Dans ce dernier cas, un diagnostic est établi afin de localiser le sous-système responsable de dysfonctionnement et d'identifier la cause de la défaillance. Ce qui permet de spécifier les opérations de maintenance à effectuer afin de remettre le système de production en état de fonctionnement.

b) Planification/Ordonnancement : Il s'agit d'établir initialement un planning prévisionnel de toutes les opérations de production et de maintenance selon les besoins de l'entreprise, et en spécifiant les ressources impliquées. Ainsi, les dates de lancement des tâches sont a priori connues en fonctionnement normal. En présence d'anomalies, un réordonnancement est alors envisagé, en tenant compte des priorités fixées au départ, pour assurer un retour vers un fonctionnement normal. L'évolution du planning devient alors dynamique suite au dysfonctionnement du système de production.

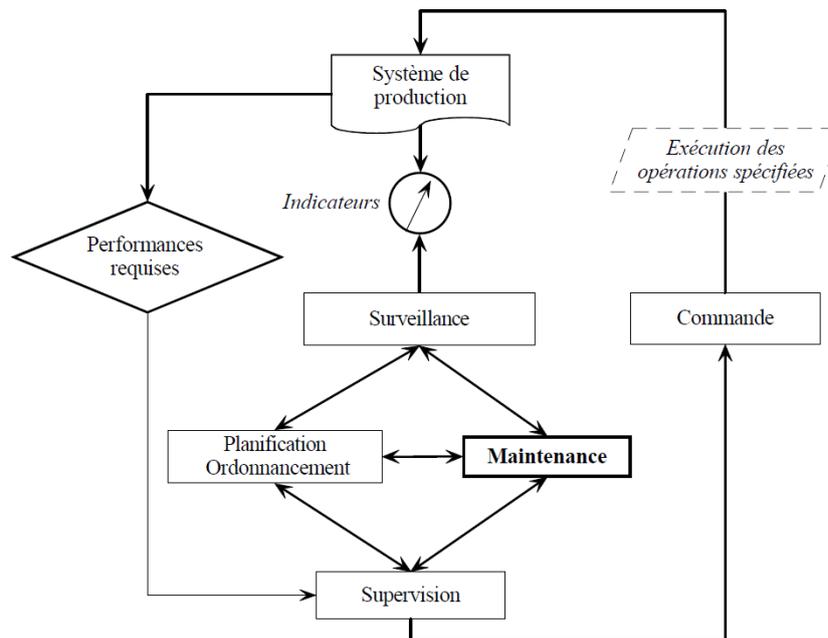


Figure I.6 : La maintenance dans la conduite du système de production

c) Supervision : La supervision contrôle et gère la conduite du système de production en fonction des performances exigées. Elle recouvre ainsi les aspects normal et anormal de fonctionnement :

– en fonctionnement normal, son rôle est de prendre en temps réel les décisions permettant d'atteindre les objectifs de production. Pour cela, elle est amenée à faire de l'ordonnancement en temps réel, de l'optimisation et à modifier en ligne la commande à appliquer [Mendez-Azua H. (2002) (34)].

– en présence d'aléas, la supervision doit prendre toutes les décisions nécessaires pour assurer le retour vers un fonctionnement normal. Il s'agit, par exemple, d'effectuer des réordonnancement lors de la réintégration d'une machine de production suite à une maintenance compte tenu de l'état du système de production. En effet, après une intervention sur la machine, le passage d'un mode d'utilisation de type "maintenance" à un état de type "production" nécessite d'amener le système dans un état spécifique compatible avec la réintégration de la machine dans la ligne de fabrication [Charles A-S. (2000) (35)].

d) Commande Le rôle de la commande est d'exécuter un ensemble d'opérations sur le système de production en réponse aux consignes de bon fonctionnement. Elle réalise les séquences d'actions préventive et corrective destinées à garantir la pérennité des outils de production. Elle est aussi chargée d'appliquer des actions prioritaires et prédéfinies sur le système commandé afin d'assurer la sécurité de l'installation et du personnel.

Maintenance Elle regroupe toutes les activités permettant d'assurer la durabilité des outils de production, selon les conditions données de sûreté de fonctionnement. Il s'agit donc de "l'ensemble des aptitudes nécessaires à un équipement à être disponible aux différents moments de son cycle de vie, en offrant les performances requises, à savoir : la fiabilité, la maintenabilité et la sécurité (sécurité des équipements, du personnel et de l'environnement)" [Francastel J.C. (2001) (36)]. Ainsi, les opérations de maintenance sont élaborées afin de garantir les performances requises de l'outil de production, en respectant les consignes de sûreté de fonctionnement tout en minimisant les coûts de maintenance engendrés.

4.3. La maintenance est un secteur en mutation

La fonction maintenance, dont la vocation est d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est désormais une des fonctions stratégiques dans les entreprises. Il n'y a pas bien longtemps que le coût et la qualité étaient les seuls facteurs concurrentiels, et la satisfaction des demandes des clients pouvait être assurée en maintenant de grands inventaires de produits finis. Actuellement, les changements technologiques rapides et les petites marges

bénéficiaires ont rendu une telle stratégie peu économique, forçant ainsi les industriels à fonctionner avec des niveaux de stockage les plus bas possibles. Toutefois, les clients ont eux aussi changé dans le sens où ils exigent des produits de haute qualité, des livraisons fiables et rapides, tout cela avec des coûts raisonnables. Sous cette pression, les industries sont contraintes de progresser continuellement sur plusieurs dimensions dont les principales sont : le coût de revient, la qualité du produit et les délais de livraison [Van Dijkhuizen G. (1998) (37)].

Bien que ces trois dimensions (coût, qualité, délai) soient généralement appliquées dans la plupart des industries, leur importance relative varie d'une firme à une autre. Par exemple, les entreprises de fabrication d'aliments dépendent principalement du rendement des machines. Les fabricants de voitures ou de montres tiennent à la qualité de leurs produits pour conserver leur image de marque. Les industries de produits de haute technologie (ordinateurs, télévisions, caméras) quant à elles, dépendent de la vitesse à laquelle leur produit est mis sur le marché. Dans ce contexte, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée au fur et à mesure de l'automatisation et de la complexité des processus de production. Elle évolue au gré de l'introduction de nouvelles méthodes de gestion, du développement technologique des outils de production, en particulier dans les domaines de la mesure et du contrôle de fonctionnement, de la systématisation progressive de l'usage des normes et des procédures.

Ainsi, le principal objectif de la maintenance est d'assurer la pérennité des équipements, de diminuer les pannes et les imprévus et de réduire les coûts de révision et de remise en état de fonctionnement. On peut synthétiser les missions de la maintenance en les plaçant sur trois plans interdépendants :

Sur le plan technique :

- ❖ Accroître la durée de vie des équipements,
- ❖ Améliorer leur disponibilité et leurs performances.

Sur le plan économique :

- ❖ Améliorer les prix de revient en réduisant les coûts de défaillance,
- ❖ Réduire le coût global de possession de chaque équipement, en particulier les équipements critiques ou sensibles.

Sur le plan social :

- ❖ Réduire le nombre d'évènements fortuits, ce qui réduit le risque d'accidents,
- ❖ Revaloriser la qualité du travail.

Avant d'aborder les différentes stratégies de maintenance existantes, il est intéressant de replacer le contexte de la maintenance dans une vision systémique d'une entreprise.

5. Les politiques de maintenance

Selon la norme [AFNOR NF EN 13306 (2001) (39)], la maintenance est « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». En d'autres termes, la maintenance apporte une contribution essentielle à la sûreté de fonctionnement d'un système de production de biens et de services. Afin d'assurer le bon fonctionnement de ses systèmes de production, toute organisation de maintenance peut définir sa stratégie de maintenance selon trois critères principaux : (1) assurer la disponibilité de l'ensemble des systèmes de production pour les fonctions requises, au coût optimum, (2) tenir compte des exigences de sécurité relatives aux systèmes à la fois pour le personnel de maintenance et le personnel d'exploitation en tenant compte des conséquences sur l'environnement, et (3) améliorer la durabilité du système et/ou la qualité du produit ou du service fourni, au coût optimum. À l'image de son évolution et de la variété de ses applications, la maintenance est constituée d'activités variées qui vont du simple nettoyage des composants jusqu'à des activités complexes comme leurs modifications et remplacements.

Ce thème de recherche a fait l'objet de nombreux travaux et plusieurs articles de synthèse largement référencés.

5.1. La maintenance de type âge

Introduite initialement par [Richard E Barlow et al. (1965) (41)] désignée dans la littérature sous le nom "Age replacement policy (ARP)". Elle suggère de remplacer l'unité de production soit après une durée prédéterminée constante de bon fonctionnement (l'âge T) ou dès l'apparition d'une défaillance. Bien évidemment, les coûts liés à un remplacement planifié sont inférieurs à ceux dû à une défaillance. Avec l'apparition des actions de maintenance de

type minimal et imparfait, plusieurs extensions ont été étudiées et plusieurs modifications ont été proposées. Désormais, cette stratégie consiste à effectuer une action de maintenance préventive à l'âge prédéterminé T ou une action de réparation en cas de défaillance. Il est important de mentionner que les actions de MP à l'âge T et les actions de MC en cas de panne peuvent être minimales, imparfaites et parfaites. Par conséquent, plusieurs modèles ont été proposés selon le type des actions de maintenance préventive et corrective choisie et la structure des coûts des actions de maintenance (Ex : constant, variable, dépend de l'âge du système). Ce qui résulte des différentes combinaisons possibles. Par exemples, une action de maintenance préventive à l'instant T peut être un remplacement (MP parfaite ou imparfaite). Une action de maintenance corrective peut être minimale ou imparfaite ainsi que pour les coûts de maintenance qui peuvent être constants, dépendent par exemple de l'âge du système ou du nombre des réparations. Plusieurs travaux [Toshio Nakagawa et al. (2011) (42)], [Minjae Park et al. (2016) (43)], Mohamed Ben-Daya et al. (2012) [44] ont été basés sur cette stratégie de maintenance de type âge afin de développer de nouvelles politiques de maintenance tenant compte de la cadence de production et de diverses contraintes opérationnelles.

5.2. La maintenance de type 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 $T, 2T, 3T, \text{etc.}$, 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.

5.3. Les stratégies de maintenance basées sur la limitation du taux de défaillance

Cette stratégie suggère que l'action de maintenance préventive n'est effectuée que lorsque le taux de panne atteint une limite prédéterminée et en cas de panne, des actions de réparations seront effectuées [Hongzhou Wang et al. (2002) (45)]. (Chang Hoon Lie et al. (1986) (46)) ont proposé un modèle de maintenance où des actions de maintenance préventive sont effectuées quand le système atteint la limite prédéterminée et en cas de panne des actions de réparation seront effectuées. Il existe d'autres travaux traitant le problème de stratégies de maintenance basées sur la limitation du taux de défaillance. On peut citer, à titre d'exemple, [Mazhar Ali Khan Malik et al. (1979) (47)], [Hoang Pham et al. (1996) (48)], [Amit Monga et al. (1997)(49)], [J-K Chan et al. (1993) (50)]. D'autres travaux et plus de détails peuvent être trouvés dans la revue de littérature de [J-K Chan et al. (1993) (51)].

5.4. Les stratégies de maintenance de type séquentiel

Contrairement à la politique de type bloc où le système est remplacé à une périodicité fixe et lors de chaque panne, pour les stratégies de type séquentiel, les interventions de maintenance préventive sont exécutées à des intervalles de temps inégaux et qui deviennent de plus en plus petits au cours du temps. En effet, quand l'âge du système augmente, le système de production nécessite plus d'action de maintenance. Dans la littérature plusieurs travaux ont étudié les stratégies de maintenance de type séquentiel [Richard E Barlow et al. (1965) (52)], [DG Nguyen et al. (1981) (53)], [Toshio Nakagawa et al. (1986) (54)], [Toshio Nakagawa et al. (1988) (55)]

5.5. Les stratégies de maintenance basées sur la limitation du coût (de la durée) des actions de maintenance

La stratégie de maintenance basée sur la limitation du coût de réparation consiste à prendre les décisions selon le coût estimé d'une action de réparation. En effet, lorsqu'un système de production tombe en panne, un coût de réparation est estimé. Si ce coût de réparation ne dépasse pas une limite prédéterminée, une action de réparation sera effectuée sinon le système sera remplacé. Cette politique a été introduite dans la littérature par [P. Gardent et al. (1963) (56)] et [RW Drinkwater et al. (1967) (57)]. L'inconvénient de cette politique est que la décision dépend du coût d'une seule réparation. Pour ce fait, [Beichelt Frank et al. (1982) (58)] a utilisé le critère du coût de réparation par unité de temps comme un

critère de décision. Par conséquent, une action de réparation sera effectuée si le coût de réparation par unité de temps ne dépasse pas une limite prédéterminée sinon le système sera remplacé. [Toshio Nakagawa et al. (1974) (59)] ont étudié la stratégie de maintenance basée sur la limitation de la durée des actions de réparation. Si la durée d'une action de réparation dépasse une limite T , une action de remplacement sera effectuée sinon le système sera réparé. En résumé, dans la littérature il existe deux types de politique de limitation : la limitation du coût de réparation et la limitation de la durée de réparation.

5.6. Les stratégies de maintenance basées sur la limitation du nombre des réparations effectuées

Comme son nom l'indique, Le nombre des réparations effectuées est un critère décisif pour la stratégie de maintenance basée sur la limitation du nombre des réparations effectuées. [Hajime Makabe et al. (1963) (60)] ont étudié cette stratégie. En effet, après les $(k-1)$ premières défaillances, une action de réparation minimale sera effectuée. Après la $k^{\text{ème}}$ défaillance, une action de remplacement aura lieu. Dans leur étude, la variable de décision est k . Plusieurs travaux ont traité la problématique des stratégies de maintenance basées sur la limitation du nombre des réparations et plusieurs extensions ont été proposées. [Hidenori Morimura et al. (1969) (61)] a proposé une extension en introduisant une nouvelle variable T (temps de référence). Selon cette nouvelle politique, et comme la stratégie de base, les $(k-1)$ premières défaillances seront corrigées avec une action de réparation minimale. Si la $k^{\text{ème}}$ défaillance a eu lieu avant le temps de bon fonctionnement cumulé T , elle sera corrigée avec une action de réparation minimale et une action de remplacement sera effectuée après la panne suivante ($(k + 1)^{\text{ème}}$). Mais si la $k^{\text{ème}}$ défaillance a lieu après le temps de bon fonctionnement cumulé T , une action de réparation sera effectuée. Les variables de décision de cette stratégie sont k et T .

5.7. Stratégies d'inspection

Selon la norme [AFNOR NF EN 13306 (2001) (62)], une inspection est un « contrôle de conformité réalisé en mesurant, en observant, en testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien. En général, l'inspection peut être réalisée avant, pendant ou après d'autres activités de maintenance ». En d'autres termes, les inspections sont nécessaires pour contrôler la dégradation du système de production et/ou son état de fonctionnement. Dans la littérature, on distingue deux familles de stratégies d'inspection : (1) les stratégies

d'inspection périodique, et (2) les stratégies d'inspection séquentielle. Dans le cas des stratégies d'inspection périodique, la durée entre deux inspections consécutives est constante. Les inspections périodiques sont adaptées particulièrement aux systèmes complexes (les avions, les navires, etc.) qui ne peuvent être inspectés à n'importe quel moment. Dans le cas des stratégies d'inspection séquentielle, la durée entre deux inspections consécutives est variable (cette durée est souvent décroissante). Les inspections séquentielles sont adaptées aux systèmes moins complexes qui peuvent être inspectés plus facilement et permettent une grande liberté pour la planification des inspections.

Depuis 1960, les problèmes d'inspection ont reçu une grande attention et plusieurs modèles ont été développés. Parmi les premiers travaux, on peut citer ceux de (Barlow et al. (1963)(63)] qui ont introduit une stratégie d'inspection dont l'objectif est de minimiser le coût total moyen engendré par les coûts des activités d'inspection ainsi que le coût de pénalité dû à l'inactivité du système. Dans [Barlow et al. (1963) (63)], un algorithme basé sur une relation de récurrence est proposé pour calculer les dates optimales d'inspection. Plusieurs extensions du modèle de [Barlow et al. (1963) (63)] ont été proposées dans la littérature. Dans [Munford, A.G et al. (1972) (64)], une stratégie d'inspection presque optimale a été suggérée et une solution proche de celle de (Barlow et al. (1963) (63)] est proposée. La stratégie développée dans [Munford, A.G et al. (1972) (64)] a été exploitée par (Munford, A.G et al. (1973) (65)], pour résoudre le même problème dans le cas où la durée de vie du système est distribuée selon une loi de Weibull. [Tadikamalla, P.R. et al. (1979) (66)]. Ont proposé des méthodes pour calculer les dates optimales d'inspection pour un système de production dont la durée de vie suit une loi gamma.

Dans les dernières décennies, différents travaux de synthèse et états de l'art ont fait le point sur les stratégies d'inspection et de maintenance existantes dans la littérature. Par exemple, [Chelbi, A et al. (2009) (67)]. Ont présenté une vue d'ensemble sur nombreuses contributions portant sur le développement des stratégies d'inspection et de maintenance pour les systèmes à dégradation aléatoire. L'objectif de ces stratégies consiste souvent à trouver les dates d'inspection qui minimisent le coût total moyen par unité de temps ou celles qui maximisent la disponibilité stationnaire du système. Toutefois, le seuil de maintenance préventive pourrait être considéré comme une variable de décision supplémentaire.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le rôle de la maintenance dans le management d'une entreprise. Les différentes politiques ainsi que les stratégies de maintenance existantes ont été détaillées. Les références existantes traitent de la maintenance d'une vision d'amélioration de l'entreprise industrielle, et d'optimiser la maintenance par la résolution des problèmes d'organisation et de gestion des ressources de maintenance. Nous abordons dans le chapitre qui suit la relation entre la fonction maintenance et la fonction production.

CHAPITRE II

La relation entre la fonction maintenance et la fonction production.

1. Introduction du chapitre :

Les interventions de maintenance réalisées sur les équipements de production nécessitent souvent un arrêt de la production. La cohabitation production - maintenance n'est pas toujours facile car la production accepte difficilement d'arrêter ses équipements pour réaliser la maintenance nécessaire pour que les équipements continuent à fonctionner. Il est important de garder en mémoire que les activités de production n'intègrent pas toujours très facilement les contraintes de maintenance parce que les problèmes d'ordonnancement et de planification entre la maintenance et la production sont toujours liés. Ce chapitre présente un état de l'art de l'intégration des fonctions de maintenance et production, on s'intéressera dans ce chapitre aux stratégies de maintenance faisant le couplage avec les politiques de gestion de l'outil de production.

2. Le système de production au service de la performance

2.1. Définition de la fonction production :

Le système de production est au cœur de l'organisation de la production. Il peut se définir comme un ensemble d'éléments matériels, immatériels et humains, relié par des flux (physiques ou d'informations) permettant la conception et la fabrication de produits (biens ou services) répondant aux attentes des clients.

Le système de production contribue à la fabrication de produits issus de la transformation de matières premières.

Le système de production est en relation avec les autres systèmes de l'entreprise.

Les autres systèmes	Liens avec le système de production (SP)
Système commercial	<ul style="list-style-type: none"> - Identifie les attentes des clients et les communique aux services de recherche et développement. - Assure la promotion et la distribution des produits issus du SP.

Système de maintenance et d'approvisionnement	<ul style="list-style-type: none"> - Assure et planifié la maintenance des équipements de production - Assure le choix des fournisseurs qui permettent de minimiser les coûts de fabrication. - Assure la logistique qui réduit les délais de livraison. - Gère les stocks de matières premières.
Système de gestion des ressources humaines	<ul style="list-style-type: none"> - Assure le recrutement des salariés compétents pour réaliser les opérations de fabrication. - Assure la formation. - Contribue à la nécessaire flexibilité de l'appareil productif (gestion des contrats temporaires, des heures supplémentaires,...).
Système financier	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de répondre aux besoins d'investissements en recherchant les financements adaptés.

Tableau II.1. La relation entre Le système de production les autres systèmes de l'entreprise

2.2. La typologie des systèmes de production

Il existe différents critères permettant de classer les systèmes de production.

Critères	Type de production	Explication et exemple
Processus technique	Production discontinue	La fabrication passe par plusieurs étapes qui peuvent être interrompues sans remettre en question l'intégrité du produit. Exemple : la production d'électroménager.
La technologie	Production continue	La fabrication ne peut être interrompue sans remettre en cause l'intégrité du produit. Exemple : la production d'acier en hauts-fourneaux ou d'électricité nucléaire.
	Production en	La fabrication conduit à des pièces uniques ou produites en

	petite série ou à l'unité	faibles quantités. Exemple : un immeuble, un lotissement de maisons.
La relation client	Production en grande série	La fabrication est standardisée et permet de produire un très grand nombre de pièces identiques. Exemple : la fabrication de téléviseurs .
	Production sur stocks (flux poussés)	La fabrication s'appuie sur des prévisions de commandes. La production est ensuite stockée avant d'être vendue. Cette technique convient quand le délai de fabrication est long ou que la réduction du coût exige des volumes importants. Exemple : la fabrication de vêtements.
	Production à la commande (flux tendus)	La fabrication débute quand le client a passé sa commande. Exemple : la fabrication d'un Airbus.

Tableau II.2. Classification des systèmes de production

2.3. La performance

La performance d'un système peut être définie comme étant l'efficacité à fournir un service attendu à un instant donné et dans des conditions prédéterminées. Elle intègre les notions de coût, délais, qualité, flexibilité (capacité de changement rapide aux modifications de l'outil de production) et valeur (la satisfaction du client). Une façon de la mesurer consiste à mesurer la distance entre ce que l'entreprise obtient avec les moyens dont elle dispose et ce qu'elle souhaite atteindre comme objectif.

2.4. La sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement (SdF) des systèmes de production est une nécessité économique. Elle consiste à assurer le respect du cahier des charges en terme de productivité, en tenant compte des perturbations (défaillances, aléas, etc.) infectant un atelier en assurant une qualité et une disponibilité maximale. Optimiser la commande, devient illusoire si l'outil de production tombe souvent en panne.

Elle intègre les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité. Elle consiste à connaître, détecter, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des

machines. L'intégration d'un service de maintenance est indispensable pour l'amélioration de la SdF et l'augmentation des performances des systèmes de production.

2.5. Objectifs de la fonction production

- **Objectif en terme de quantités produites** : la fonction de production doit permettre à l'entreprise de satisfaire la demande qui lui est adressée ce qui suppose que l'entreprise adapte sa capacité de production au volume des ventes. Ceci passe par des actions visant à maintenir en l'état les capacités productives ou par la mise au point de plans d'investissements en capacité.

- **Objectif en termes de qualité** : les biens économiques produits doivent être de bonne qualité, c'est-à-dire doivent permettre de satisfaire les besoins de la clientèle. Mais la production doit aussi être de qualité en termes d'utilisation de ressources afin de respecter le critère d'efficience attaché au système productif.

Le système productif doit donc être économe en ressources et constant en terme de qualité.

- **Objectif de coût** : le système productif adopté par l'entreprise doit proposer les plus faibles coûts de production possibles de manière à garantir la compétitivité de l'entreprise. De plus, les coûts de production calculés doivent aussi être mis en relation avec les coûts de production prévus par le centre opérationnel. Sur la longue période, cet objectif de coût se traduit par la recherche permanente de gains de productivité afin de détenir ou de conserver un avantage compétitif coût pour l'entreprise.

- **Objectif de délai** : le système de production doit certes produire, mais dans des délais raisonnables, c'est-à-dire en conformité avec le niveau de la demande à laquelle doit faire face l'entreprise. Ceci suppose la mise en place d'un mode de production réactif qui permettra soit d'éviter des stocks de biens finaux, soit de ne pas connaître de goulets d'étranglement. En terme de productivité, l'objectif de délai signifie aussi réduire les délais de fabrication.

- **Objectif de flexibilité** : le système productif doit être flexible soit pour pouvoir s'adapter aux variations de la demande, soit pour tenir compte des évolutions de

l'environnement productif de l'entreprise (innovations technologiques...), soit pour permettre une production simultanée de plusieurs types de produits différents en même temps.

3. Organisation de la production :

L'organisation de la production est passée par plusieurs étapes en fonction des tendances de marché qui caractérisaient l'environnement économique. Les nouvelles formes d'organisation du travail inspirées du Toyotisme (développé par les responsables de production de la firme japonaise Toyota en 1950) s'inscrivent dans une logique de qualité totale qui consiste à développer un processus continu d'amélioration du processus de production à partir de la mobilisation de l'ensemble des personnels impliqués au niveau des méthodes de gestion de la qualité. Cette recherche de qualité totale est symbolisée par le principe des « 5 zéros »:

3.1. La méthode des 5 zéros

Zéro défaut : le processus de fabrication doit limiter au maximum les défauts de fabrication de manière à éviter le gaspillage des ressources utilisées pour produire. Le contrôle de la qualité du processus productif ne se limite donc plus à un contrôle à la fin du processus productif mais intégré dans l'ensemble de la chaîne de production.

Zéro panne : la recherche d'une efficacité optimale du processus productif (afin de garantir des gains de productivité) se traduit par la mise en place d'un système de maintenance préventif qui vise à éviter les pannes plutôt qu'à intervenir une fois celles-ci constatées (ce qui entraîne alors un arrêt temporaire de la production).

Zéro délai : les gains de productivité vont par ailleurs être obtenus par la mise en place d'un système de production en continu ce qui dans le cadre d'un mode de production flexible se traduit par l'élaboration de processus de production facilement reprogrammables et adaptables.

Zéro stocks : des gains de productivité peuvent aussi être obtenus par la suppression des stocks de produits finis ou de produits intermédiaires qui coûtent chers à l'entreprise. La production va donc être organisée selon le principe de la production au « juste-à-temps ».

Zéro papier : la flexibilité de l'outil de production ne pourra être obtenu que par une organisation plus souple et donc moins dépendante de procédures administratives complexes

qui ralentissent le processus de décision. Le système d'information devient donc moins formel et moins vertical.

La double problématique « productivité-flexibilité » trouve ainsi concrètement une application au sein de l'entreprise par la mise en pratique de ces principes des « cinq-zéros ».

La mise en application de ces principes dans l'entreprise se traduit entre autre par une nouvelle forme d'organisation du travail qui, sans remettre en cause nécessairement la notion de chaîne de production, réoriente le processus de production autour du concept de juste-à-temps (appelé aussi production en flux tendus).

3.2. La méthode du juste-à-temps

Ce mode d'organisation suppose que l'ensemble des fonctions de production repose sur un système de pilotage par l'aval du cycle de production.

Ce principe s'applique à la fois au cycle de production qui doit se contenter de produire la quantité réelle de biens demandés par les clients, et au niveau des approvisionnements qui doivent coller aux variations du volume de production.

Les conséquences du juste à temps :

La première conséquence d'une telle approche est que l'existence de stocks, que ce soient de produits finis ou de produits intermédiaires, ne constituent plus une variable classique d'ajustement mais ils sont l'expression d'un dysfonctionnement qu'il faut éviter.

La seconde conséquence est que l'entreprise ne fonctionne plus comme une entité autonome de production mais doit développer ce nouveau mode de production en développant des relations plus fortes avec ses fournisseurs de manière à ce que ceux-ci adaptent leur mode de production selon les principes du « juste-à-temps ».

La troisième conséquence est que l'appareil de production de l'entreprise doit disposer d'un certain degré de flexibilité lui permettant de s'adapter aux variations de la demande que ce soit en terme de volumes (les capacités de production doivent garder un potentiel d'accroissement de la production), ou en terme de produits (les outils industriels doivent être polyvalents et permettre d'alterner différents types de production).

La quatrième conséquence est que les fonctions opérationnelles doivent pouvoir intervenir rapidement pour garantir le bon fonctionnement de l'outil industriel, soit pour faire face à des problèmes de maintenance, soit pour pouvoir s'adapter aux évolutions des modes de production (plus grande flexibilité des hommes).

La cinquième conséquence réside dans la circulation de l'information dans l'entreprise qui se doit être à la fois verticale (mais cette fois-ci en partant de l'aval) mais aussi horizontale (pour permettre une gestion optimale des flux physiques reliant les différents ateliers : exemple du Kanban).

Enfin, la mise en place d'un système de production en flux tendus suppose que l'appareil productif fonctionne de la manière la plus optimale possible ce qui suppose une démarche constante de recherche de la qualité, que ce soit en terme de produit que soit en mode de production.

4. Modèle conceptuel d'un système de production

Les systèmes de production peuvent être des systèmes très complexes et difficiles à gérer au vu de toutes leurs composantes fonctionnelles (fabrication, achat, distribution, maintenance...). Ils sont donc beaucoup étudiés, et ce depuis longtemps. Plusieurs approches ont été envisagées dans le but de mieux comprendre leur fonctionnement et de mieux les appréhender.

Il est possible de décomposer les systèmes de production en trois sous-systèmes: **Le système physique** de production, **le système d'information** et **le système de décision** (Figure II.1). Le système couramment appelé **système de gestion de production** est constitué par la partie du système de décision et du système d'information traitant des fonctions rattachées directement à la production (par exemple, les achats, les approvisionnements, la planification, la gestion des ressources, la maintenance, etc.).

En termes de système, **le système physique** transforme les matières premières en produits finis. Pour effectuer cette transformation, il est commandé par **le système de gestion** qui transforme les informations à caractère commercial en ordres de fabrication et ordres d'approvisionnements. Le système est bouclé puisqu'en retour, il reçoit les informations de suivi du système physique pour pouvoir effectivement piloter ce dernier.

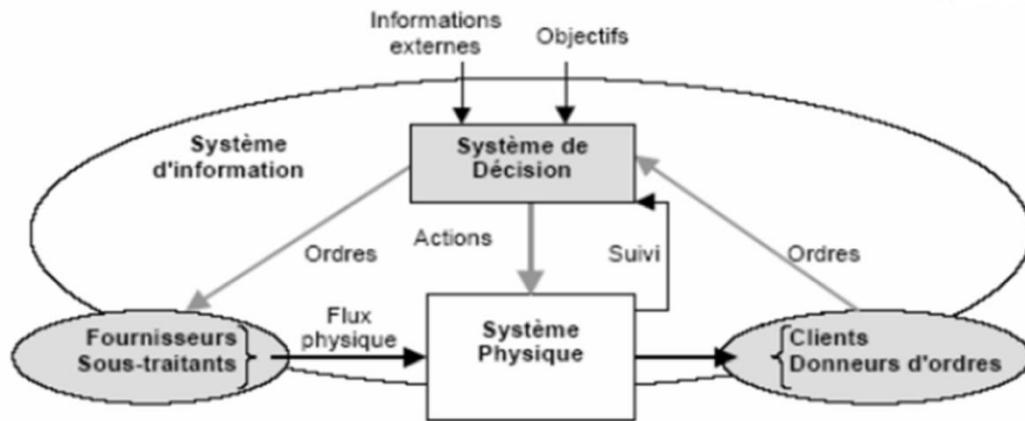


Figure II.1 : Modèle conceptuel d'un système de production

En termes de flux, un ensemble de flux régulés parcourt le système de production. Tout d'abord, le flux physique ou de matière qui transforme la matière première et les composants en produits finis, puis le flux d'information ou de suivi qui permet la circulation des informations nécessaires au contrôle et à la prise de décision. Enfin, le flux de décision ou ordre qui contrôle et pilote le système physique. Le système de gestion est composé de différentes activités:

- L'élaboration du Plan Directeur de Production (PDP);
- Le calcul des besoins bruts, nets et d'approvisionnements ;
- La gestion des stocks ;
- Les achats ;
- L'élaboration du plan de charge ;
- L'ordonnancement ;
- Le lancement ;

4.1. Dégradation des systèmes de production

Cette section est consacrée à la définition de la dégradation des systèmes de production ainsi qu'à la présentation des modèles de dégradation. Outre la définition de la dégradation, quelques définitions concernant le système de production et ses caractéristiques sont données. Ces différentes définitions se basent sur la littérature dans le domaine de maintenance ainsi que la norme [AFNOR NF EN 13306 (2001) (68)].

4.1.1. Défaillance des systèmes de production

Selon la norme [AFNOR AFNOR NF EN 13306 (2001) (69)], la défaillance est définie comme la « cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise. Après une défaillance, le bien est en panne, totale ou partielle. Une défaillance est un événement à distinguer d'une panne qui est un état ». On dira qu'un système de production est en état de défaillance lorsqu'il n'est plus en mesure de remplir la mission pour laquelle il a été conçu. Cette défaillance peut être due à sa conception, sa fabrication, son installation, voire même sa maintenance. Tout système de production est sujet au vieillissement et à l'usure [Valdez-Flores et al. (1989)(70)]. Ces phénomènes physiques provoquent la défaillance qui a un impact important sur le coût d'exploitation du système ou sur la sécurité. D'autres phénomènes physiques comme l'érosion d'après [Van Noortwijk et al. (2009) (71)] et la corrosion [Ropital, F et al. (2009) (72)] provoquent la défaillance des systèmes de production. Après l'apparition de telles défaillances, le système de production est déclaré en état de panne. En effet, la panne du système, selon la norme [NF EN 13306 (73)], est définie comme l'« état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures. »

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont présenté de nombreuses classifications des défaillances. Par exemple, [Rausand, M et al. (2004) (74)] ont classifié les défaillances selon la cause (défaillance primaire, secondaire, ou due à une mauvaise commande), selon le temps (défaillance graduelle (progressive) ou soudaine), selon la détectabilité (défaillance apparente ou cachée), et selon le degré (défaillance partielle ou complète). La défaillance primaire est due à un défaut de conception du système de production. La défaillance secondaire est due à un défaut de fabrication. [Deloux, E et al. (2008)(75)] a classifié les défaillances selon la cause d'une part, et selon l'impact sur les performances du système d'autre part.

1. La classification des défaillances par cause distingue les défaillances aléatoires des défaillances systématiques.

- ❖ Les défaillances aléatoires sont des défaillances physiques pour lesquelles les performances du système diminuent. Elles peuvent être liées à la dégradation du système (vieillissement du système) ou à des stress excessifs du système (solicitations extérieures du système ou erreurs humaines durant la maintenance).

❖ Les défaillances systématiques peuvent être liées à la conception du système de production, à sa fabrication, ou aux interactions avec le milieu extérieur. Ces défaillances induisent la diminution des performances du système alors que ce dernier n'est physiquement pas dégradé. Les défaillances systématiques peuvent être éliminées uniquement par une modification de la conception, du processus de fabrication, ou des procédures d'opération.

2. La classification des défaillances en fonction de leurs impacts sur les performances du système distingue les défaillances intermittentes des défaillances étendues.

- ❖ Les défaillances intermittentes résultent d'une perte de certaines fonctions du système pour une courte durée. Le système retrouve ses performances d'opération juste après la défaillance.
- ❖ Les défaillances étendues résultent d'une perte de certaines fonctions du système. Cette perte perdure dans le temps jusqu'à ce que le système soit restauré (remplacé ou réparé). La défaillance étendue peut être complète (perte totale de la fonction principale) ou partielle (perte de certaines fonctions). La défaillance étendue peut être soudaine (non prédite par test) ou graduelle (prédite par test ou inspection). Une défaillance graduelle implique une perte progressive des performances du système. Cette défaillance est connue dans la littérature par dégradation. la norme [NF EN 13306 (73)], la dégradation est l'« évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une cause externe ».

4.1.2. Classification des défaillances par type

La classification par type, distingue entre les défaillances endogènes et les défaillances exogènes (figure II.2).

- ✓ **Les défaillances endogènes** : ce sont des défaillances physiques c'est-à-dire que la performance du système diminue à cause d'une dégradation physique. Dans ce type de défaillance, on distingue :
- ✓ Les défaillances dues à l'usure : Défaillance dont la probabilité d'occurrence augmente avec la durée d'utilisation, le nombre d'unités d'usage ou bien avec les sollicitations auxquelles il est soumis. Ce type de défaillance est dit aussi 'dépendant des opérations'. Il peut seulement survenir quand la machine est opérationnelle et il dépend du taux de production, du volume de production durant un cycle donné ou du nombre de cycles de production d'après [Bassem

Bouslah et al. (2015) (76)]. [L. E. Hanin et al. (1975)(77)] a montré, dans une étude des arrêts des lignes de production dans l'industrie automobile, que 84% des défaillances sont dépendantes des opérations.

- ✓ Les défaillances dues au vieillissement : Défaillance dont la probabilité d'occurrence augmente au cours du temps calendaire. Ce type de défaillance est dit "dépendant du temps" une panne de ce type peut survenir même quand la machine est en état d'arrêt. Le taux de pannes augmente avec l'avancement du temps et est due aux phénomènes autres que l'usure d'après [Bassem Bouslah et al. (2015) (78)]. [L. E. Hanin et al. (1975) (79)] a montré, dans la même étude, que seulement 16% des défaillances sont dépendantes du temps.

- **Les défaillances exogènes** : ce sont des défaillances non-physiques c'est à dire que la performance du système de production diminue bien que le système n'est pas physiquement dégradé. Ce de défaillance peut être éliminé, à titre d'exemple, par changement de la conception du système de production, le processus de fabrication ou le mode opératoire. Dans les défaillances exogènes, on distingue :

- ✓ Les défaillances dues à la conception : des défaillances dues à la phase d'étude préliminaires, la fabrication ou l'installation.
 - ✓ Les défaillances dues aux interactions : des défaillances dues aux erreurs humaines durant les phases d'opération, de maintenance ou de test.

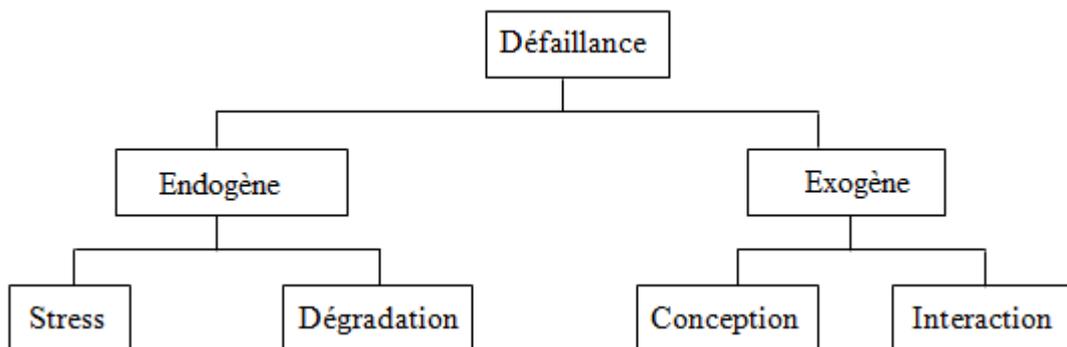


Figure II.2 : Classification des défaillances par type

Selon les résultats de [L. E. Hanin et al. (1975) (80)], qui a montré qu'en pratique, 84% des défaillances sont dues à l'usure contre seulement 16% qui sont dues au vieillissement, il est plus logique d'utiliser les modèles de défaillances aléatoires dues à l'usure pour modéliser la fiabilité des systèmes de production.

Dans ce manuscrit, on s'intéresse en premier temps uniquement aux défaillances aléatoires et en particuliers à celles dues à l'usure. En effet, dans nos travaux, notre objectif consiste principalement à déterminer le nombre de lot à produire avant d'effectuer des actions de maintenance préventive. Implicitement, dans notre modélisation, on tient uniquement compte des temps où la machine est opérationnelle. Puis, en deuxième partie, on considère les défaillances systématiques et plus spécifiquement celles dues aux interactions en prenant la maintenance imparfaite comme exemple.

4.1.3. Classification des défaillances par cause

Les défaillances peuvent être également classées en fonction des causes de leurs apparitions. Les causes de défaillances sont définies comme "les circonstances au cours de spécification, conception, fabrication, de l'utilisation ou de la maintenance qui entraînent la défaillance".

- **Spécification** : des défaillances dues à la définition de base des besoins du client. Autrement dit, le cahier des charges ne respecte pas les exigences définis par le client.

- **Conception** : des défaillances dues à une conception inadaptée au fonctionnement attendu du système.

- **Fabrication** : des défaillances dues à une non-conformité au niveau de la fabrication par rapport à la conception du produit ou au niveau du procédé de fabrication.

- **Utilisation** : des défaillances dues à une mauvaise manipulation, un mauvais usage dépassant la capacité du système de production ou dues au vieillissement (défaillance dont la probabilité d'occurrence augmente au cours du temps calendaire).

- **Maintenance** : des défaillances dues au non-respect du planning de maintenance ou dues au déroulement de l'activité de maintenance.

Cette classification des défaillances par cause est illustrée par Figure II.3 suivante

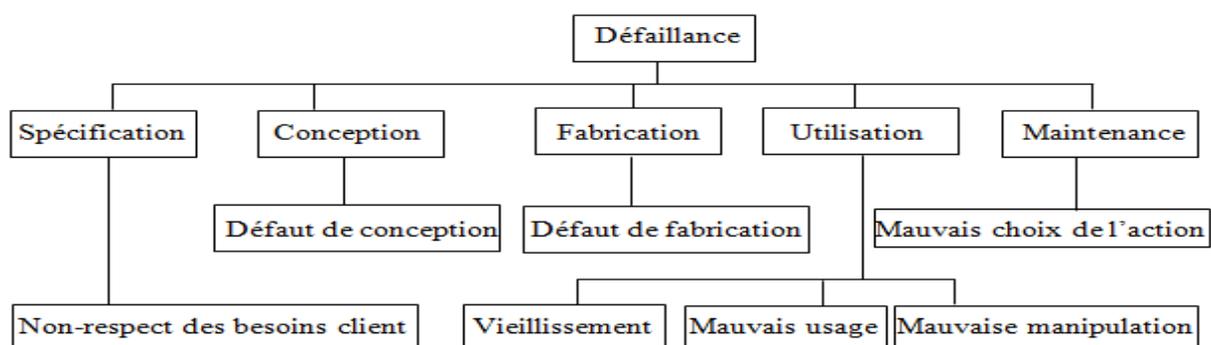


Figure II.3 : Classification des défaillances par cause

4.1.4. Classification des défaillances par impact sur l'état du système (mode de défaillance)

Les défaillances peuvent aussi être classées selon le mode de défaillance. Ce dernier est défini comme "la manière dont l'incapacité d'un bien à accomplir une fonction" et, d'autre part, par "la fonction perdue ou la transition d'état qui s'est produite". Trois classes de défaillances sont identifiées :

- Défaillance intermittente : définie comme étant une défaillance d'un dispositif pour une période de temps limitée après laquelle le dispositif retrouve son aptitude à accomplir sa fonction requise sans avoir été soumis à une action corrective extérieure. Ce mode de défaillance est souvent répétitif.

- Défaillance complète : Définie comme étant une défaillance résultant de déviations d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées telle qu'elle entraîne une disparition complète de la fonction requise.

- Défaillance partielle : Définie comme étant une défaillance résultant de déviations d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complète de la fonction requise.

En fonction de la rapidité de manifestation de la défaillance, les deux défaillances complète et partielle peuvent elle-même être divisées en deux types :

- Défaillance soudaine : ce mode de défaillance a été défini comme étant une défaillance qui ne peut pas être prévue par un examen ou une surveillance de fonctionnement préalable. Une défaillance, en même temps, complète et soudaine est dite " Défaillance catastrophique ".

- Défaillance graduelle ou progressive : une défaillance progressive est définie comme étant une défaillance qui aurait pu être prévue par un examen. Une défaillance, en même temps, partielle et graduelle est dite "défaillance dégradée "

5. La maintenance intégrée à la production

5.1. Stratégies de maintenance intégrée

Le problème d'intégration de la maintenance avec d'autres fonctions comme la production et la qualité a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. La maintenance, la production et la qualité sont trois fonctions principales dans n'importe quel système industriel. Dans la pratique, ces trois fonctions sont souvent gérées séparément malgré qu'elles soient en réalité étroitement inter-liées. Ces différentes fonctions ont été largement traitées dans la littérature séparément mais ces dernières années une attention particulière a été portée aux politiques de maintenance intégrées à l'une de ces fonctions ou les deux simultanément. Cette tendance est motivée par le fait que les politiques d'intégration de plus qu'une fonction permettent d'améliorer, la productivité, la qualité des produits finis et de réduire considérablement les coûts.

5.2. Intégration maintenance et production

Depuis les années 1990, plusieurs recherches sur l'intégration des politiques de maintenance préventive et de production ont été publiées dans la littérature et plusieurs chercheurs ont traité la problématique d'intégration de maintenance et production de différents points de vue. Certains ont étudié l'intégration entre la maintenance et la planification de la production, d'autres ont traité l'intégration entre la maintenance et la gestion des stocks et d'autres la maintenance et la quantité économique de production. Autrement dit cette approche consiste à considérer simultanément les paramètres de production (taux de production, niveau de stock, demande..) et ceux de maintenance (durée des réparations, le taux de défaillance, coût des actions de maintenance) afin d'optimiser le fonctionnement global du système [M Abdur Rahim et al. (2012) (81)], une planification intégrée de la maintenance préventive et de la production permet de réduire les arrêtes, les retards et la replanification de la production et par conséquent permet d'augmenter la productivité et réduire les différents coûts.

5.3. Planification de production et maintenance

Dans cette section, nous considérons des modèles dans lesquels l'effet de la production sur la maintenance est explicitement pris en compte. Les modèles ne concernent que les décisions de maintenance, mais ils ne donnent pas de conseils sur la planification de la production.

Les modèles développés dans les articles de cette catégorie montrent qu'un bon plan de maintenance, intégré au plan de production, peut entraîner des économies considérables. Cette intégration avec la production est cruciale car la production et la maintenance ont une relation directe. Toute panne de la machine entraîne une interruption de la production et entraîne des coûts supplémentaires dus aux temps d'arrêt, à la perte de production, à la baisse de productivité et de qualité et à une utilisation insuffisante du personnel, des équipements et des installations. Ci-dessous, nous passons en revue les articles suivant ce flux de recherche dans l'ordre chronologique.

La maintenance est liée à la production de plusieurs manières. Tout d'abord, la maintenance est destinée à permettre la production, mais l'exécution de la maintenance doit souvent être interrompue. Cet effet négatif doit donc être pris en compte dans la planification et l'optimisation de la maintenance. Elle intervient de manière spécifique dans le coût des temps d'arrêt et de la maintenance des opportunités. Tous les articles prenant explicitement en compte l'effet de la production sur la maintenance entrent dans cette catégorie.

Deuxièmement, la maintenance peut également être considérée comme un processus de production qui doit être planifié. La planification à cet égard implique de déterminer les niveaux appropriés de capacité par concernant la demande.

Troisièmement, la planification de la production dans laquelle il faut prendre en compte les travaux de maintenance. Le fait est que les travaux de maintenance suppriment la capacité de production et qu'ils doivent donc être planifiés avec la production. La maintenance doit être effectuée soit en raison d'une défaillance, soit par la qualité des articles produits n'est pas suffisante. Dans cette troisième catégorie, nous considérons également la planification intégrée de la production et de la maintenance.

Dans cette section, nous considérons la maintenance comme un processus de production qui doit être planifié. La planification à cet égard implique de déterminer les niveaux de capacité appropriés concernant la demande. Il sera clair que cette activité ne peut être effectuée que pour une maintenance planifiée.

L'aspect spécifique de la planification de la production et maintenance avec la planification de la production standard est généralement plus d'événements imprévus et de travaux d'entretien correctifs intermédiaires que dans la planification de production régulière.

Les travaux que nous avons trouvés dans cette catégorie sont ceux de [Dijkstra et Yan(82)], et [Yan, S et al. (2004)(83)], qui envisagent tous deux des problèmes de détermination de la main d'œuvre et d'allocation en cas de charge de travail nécessaire pour la maintenance des aéronefs. [BengÄu, G et al. (1994) (84)] discute de l'organisation de centres de maintenance spécialisés pour effectuer des travaux de maintenance particuliers dans le secteur des télécommunications.

Les travaux de [Gharbi et al. (2005)(85)] considèrent le problème de la détermination des paramètres optimaux de la politique de maintenance préventive pour les équipements individuels dans les usines à usages multiples. Afin de formuler des politiques de maintenance, les avantages de la maintenance, sous la forme de taux de défaillance réduits, doivent être mis en balance avec les coûts. L'approche de cette étude tente tout d'abord d'évaluer l'effet du taux de défaillance d'un équipement sur la performance globale de l'installation. Un problème de planification intégrée de la production et de la maintenance est également résolu pour déterminer les effets de la production de particules. Enfin, les résultats de ces deux procédures sont ensuite utilisés dans un problème d'optimisation final qui utilise la relation entre le taux de défaillance et les coûts des différentes politiques de maintenance pour sélectionner la politique de maintenance appropriée.

[Dedopoulos et al. (1995) (86)] présentent une approche permettant d'identifier le calendrier de maintenance optimal pour les composants d'un système de production. Les objectifs de sécurité, de santé et d'environnement, les coûts de maintenance et les coûts de perte de production sont tous pris en compte. L'approche est flexible car elle peut être réalisée à différents niveaux de détail.

[Vatn et al. (1996) (87)] décrivent la planification de la maintenance préventive des groupes électrogènes dans une centrale électrique comme des problèmes de satisfaction de contraintes. L'objectif général de la détermination d'un calendrier de maintenance est de déterminer la durée et la séquence des pannes des groupes électrogènes sur une période donnée, tout en minimisant les coûts d'exploitation de maintenance au cours de la période de planification.

[Frost et al. (1998) (88)] développe des fonctions d'indisponibilité et de coût pour les composants dont les défaillances peuvent se produire de manière aléatoire. La défaillance ne peut être détectée que par des tests ou des inspections périodiques. Les composants sont

renouvelés périodiquement par maintenance préventive ou par réparation ou remplacement après une panne, selon la première éventualité (remplacement d'âge). Le modèle prend en compte les durées de réparation et de maintenance ainsi que les coûts liés aux essais, aux réparations, à la maintenance et aux pertes de production ou d'accidents. Pour les unités fonctionnant normalement, la pénalité liée au temps est la perte de production. L'objectif est de minimiser le taux de coût total en ce qui concerne l'inspection et l'intervalle de remplacement.

[Shijin et al. (2013) (89)] a étudié la problématique d'intégration entre la maintenance préventive imparfaite et la planification de la production pour un système de production composé d'une seule machine et sujet à des pannes aléatoires. Afin de réduire les risques de défaillance, des actions de maintenance préventive et des actions de révision sont effectuées d'une façon périodique. Les actions de maintenance préventive sont supposées imparfaites et les actions de révisions sont considérées comme parfaites. En cas de pannes, des actions de réparations minimales seront effectuées. L'auteur traite un problème de dimensionnement de lot multi-produit avec capacité limitée. L'objectif consiste à déterminer simultanément la durée optimale du cycle de la maintenance préventive ainsi que la durée optimale du cycle de révision en minimisant une fonction du coût total intégrant le coût des actions de maintenance préventive, corrective et de, le coût de setup, le coût de production et les coûts de stockage et de pénurie. En se basant sur des exemples numériques, il prouve l'efficacité économique de la stratégie intégrant la maintenance et la production.

[Dellagi et al. (2017) (90)] étudié la problématique de planification de la production en tenant compte de l'influence de la variation du taux de production sur le taux de défaillance du système de production. Les auteurs proposent une stratégie de maintenance périodique avec réparations minimales en cas de pannes. Ils considèrent un système de production constitué d'une seule machine produisant un seul type de produit et doit satisfaire une demande aléatoire suivant la loi normale. La machine est sujette à des pannes aléatoires. L'objectif est de déterminer un plan de production et de maintenance optimal toute en minimisant une fonction objective contenant un coût de production. La solution optimale consiste à déterminer simultanément la quantité optimale à produire chaque période durant un période optimale T pour effectuer l'action de maintenance préventive.

5.4. Modèles d'intégration Maintenance production

L'impact de la variation de la cadence de production sur l'intensité des défaillances et l'intensité de la dégradation de la qualité a été démontré dans plusieurs études industrielles et a incité plusieurs chercheurs à développer des modèles analytiques intégrant la maintenance, la production et la qualité. Cet effet direct du taux de production a été observé dans plusieurs contextes industriels tels que dans l'industrie automobile et les processus d'usinage et de découpage des métaux [Bassem Bouslah et al. (2015) (91)].

Les auteurs du travail [Bassem Bouslah et al. (2016) (92)] ont proposé une stratégie intégrant la maintenance, la production et la qualité dans le contexte d'un problème de dimensionnement de lot multi-produits et multi périodes à capacité finie et formulé par une programmation non- linéaire mixte. Le système de production est considéré imparfait qui commence à produire une fraction des items non conforme dès qu'il passe à l'état " hors contrôle ". Des inspections et des actions de maintenance préventive sont effectuées d'une façon périodique. Les actions de maintenance préventive sont supposées imparfaites et permettent de réduire l'âge du système de production proportionnellement au niveau de l'action. L'objectif est de minimiser le coût total contenant des coûts liés à la maintenance, la production et la qualité. Cette optimisation permet de déterminer simultanément un plan optimal de production ainsi que le niveau optimal de l'action de maintenance en tenant compte des coûts liés à la qualité. Un algorithme de résolution a été proposé et illustré par des exemples numériques. Les auteurs ont constaté que l'augmentation du niveau de l'action de la maintenance préventive entraîne une diminution des coûts de contrôle qualité. Par ailleurs, si le coût des actions de la maintenance préventive n'est pas compensé par la réduction des coûts de contrôle qualité, l'action de la maintenance préventive n'est plus justifiable.

La préoccupation majeure de tous les gestionnaires dans un monde industriel, a été le maintien en état de fonctionnement de l'outil de production, surtout que les notions de créativité, de coûts et de qualité deviennent décisifs, et où il est vital de compter sur un système de production disponible et performant à tout instant. Dans l'industrie, le manque de communication entre les services de production et la maintenance crée une situation conflictuelle entre ces deux services. Le non-respect des périodes de maintenance préventive et les arrêts imprévus des systèmes de production contribuent dans la perturbation et la perte de la productivité puisque la disponibilité des équipements, au moment voulu, est une condition nécessaire pour la bonne marche de la production et au respect des délais de livraisons. Cependant, l'exécution des actions de maintenances exigent l'arrêt des systèmes de

productions. Ceci montre que les fonctions de maintenance et de production partagent les mêmes ressources. Malgré cela, il y a une distinction dans la gestion de ces deux fonctions vitales, notamment dans la planification de leurs activités.

Ces dernières années, il y a eu émergence de travaux qui proposent des modèles qui tentent d'intégrer la production, la qualité et la maintenance [Radhoui, M et al.(2010) (93)] ; [Rahim, M et al. (2001) ([94)]. La planification de la production concerne généralement la détermination de la taille des lots et l'évaluation des besoins en capacité, dans le cas d'une demande fluctuante. La taille du lot optimale et les besoins en capacité sont influencés par les pannes. D'autre part, la maintenance prévoit les pannes et améliore la qualité. En conséquence, la maintenance et la production doivent être planifiées de manière intégrée [Nahmias, S. (2004) (95)].

D'après [Budai-Balke et al. (2008) (96)] les modèles de planification de la maintenance intégrée à la production sont subdivisés en quatre catégories :

- modèles de haut niveau considérant les problèmes conceptuels et de conception de processus ;
- modèles de la quantité optimale à produire, qui a été initialement posée comme un simple problème de stock, mais a été étendu à traiter avec les aspects de la qualité et des pannes
- modèles des systèmes de production avec stock tampon, qui par définition sont appropriés pour faire face à des pannes
- modèles d'optimisation des taux de production et de la maintenance, dont le but est de trouver le taux de production et de la maintenance préventive et corrective des machines de manière à minimiser le coût total de l'inventaire, de la production et de la maintenance.

5.4.1. Modèle de conception et conceptuel de processus ;

Certains nombre d'articles développent les modèles conceptuels qui intègrent les aspects préventifs et correctifs de la planification de la maintenance avec les aspects des systèmes de production comme la qualité, le niveau de service et la capacité des activités.

Par exemple [Finch et al. (1986) (97)] traite le cadre conceptuel intégrée pour la maintenance et la production dans lequel ils présentent en particulier la question de la main d'œuvre dans les actions de maintenances correctives et préventives. [Weinstein et al. (1999)

(98)] a testé l'hypothèse que l'intégration de la politique de maintenance avec la planification agrégée influence significativement la réduction du coût total. Il apparaît que c'est le cas dans le cadre expérimental étudié dans cette étude. [Lee et al. (2005)(99)] a développé un modèle coût/bénéfice des stratégies d'investissement sur l'inventaire et la maintenance préventive sur des systèmes de production imparfaits.

D'autres articles ont traité le problème de la conception intégrée à la production et la maintenance. Les décisions sur le processus de production et la fiabilité initiale des équipements sont réalisées au stade de la conception. [Pistikopoulos et al. (2000) (100)] décrit un cadre d'optimisation des modèles généraux multi processus, qui déterminent simultanément la conception ainsi que les plans de la production et de la maintenance optimale. Dans ce cadre, le processus de base et les caractéristiques de fiabilité et de maintenabilité du système sont déterminés dans la phase de conception avec la sélection de la structure du système et ses composants. Les caractéristiques restantes sont déterminées à la phase des opérations avec la sélection de la politique de production et de maintenance appropriée. Par conséquent, l'optimisation de l'efficacité du processus dépend de l'optimisation simultanée de la conception, la politique de production et de la maintenance en tenant en compte leurs interactions.

5.4.3. Modèle de La quantité économique à produire avec pannes

Dans le modèle de la quantité économique à produire, Le but de ce modèle est de trouver le temps de production qui minimise le coût moyen de la somme des coûts de stockage et de lancement de commande. Ce modèle est l'extension de celui de la quantité économique à commander.

Dans la littérature traitant en général les problèmes de production et d'inventaire, le système de production est souvent supposé fiable, qu'il ne s'interrompt pas et qu'il ne produit que des produits conformes. Malheureusement, en réalité ce n'est pas toujours le cas. Le système de production peut s'interrompre à cause des pannes des machines ou encore due à la non qualité des produits. Le modèle de la quantité économique à commander a été étendu pour traiter ces aspects. La littérature qui traite les modèles de la quantité économique à produire peut être divisée en deux catégories [Budai-Balke, G et al. (2006) (101)]. La première considère les problèmes du modèle quantité économique à produire qui tiennent compte des aspects de la qualité des produits. La seconde catégorie des modèles quantité économique à produire,

analyse les effets des pannes stochastiques des machines sur le dimensionnement des lots de décisions.

[Groenevelt et al. (1992) (102)] ont considéré l'effet des pannes aléatoires et de la maintenance corrective sur le dimensionnement de la taille du lot économique. La maintenance est effectuée après une panne ou après un intervalle de temps prédéterminé selon ce qui se produit le premier. Ils ont considéré deux politiques de production. Sous la première, lorsque la machine tombe en panne, le lot interrompu n'est pas repris, et ne commence un nouveau lot que lorsque tous les stocks disponibles sont épuisés. Dans la deuxième politique, la production est immédiatement reprise si l'inventaire en main est en dessous d'un certain niveau. Les auteurs ont montré que sous ces deux politiques, la taille du lot optimale augmente avec le taux de panne, et qu'en supposant un taux de panne constant et un temps de réparation instantané, la taille optimale du lot est toujours plus grande que celle de la quantité économique à produire. Néanmoins, [Groenevelt et al. (1992) (103)] proposent d'utiliser la quantité économique à produire comme une approximation de la taille optimale du lot de production. Ils ont également étudié le problème du choix de la taille du lot économique d'un système de production non fiable avec un taux de panne constant et un temps de réparation aléatoire [Groenevelt, H et al. (1992)(104)]. La quantité de stock de sécurité utilisée quand la machine est en réparation est déterminée à partir d'un niveau de service demandé.

Récemment [Lin et al. (2006) (105)] ont déterminé l'impact des pannes sur la décision du temps de production optimal d'un système de production fabricant des items défectueux suivant une loi exponentielle, sous une politique de non reprise (le lot interrompu sera abandonné). Sous cette politique, un cycle de production est exécuté pendant une période de temps prédéterminée à condition qu'aucune panne de machine n'ait eu lieu au cours cette période. Sinon, le cycle de production est immédiatement interrompu. Le stock est construit progressivement tant que le système de production est disponible. Un nouveau cycle de production ne commence que lorsque tous les inventaires en main sont épuisés. Si une panne se produit, alors une maintenance corrective de durée fixe est effectuée. Si le stock cumulé durant la période de production n'est pas assez pour satisfaire la demande, il y aura des pénuries (commandes perdues). Une action de maintenance remet le système aux conditions initiales de travail.

5.4.3. Modèle de la détérioration du système de production avec capacité du stock tampon

Comme dans le cas du modèle quantité économique à produire, un stock tampon est construit au cours de la disponibilité du système de production afin de diminuer l'impact des pannes des machines du système de production. Le rôle d'un tel stock est de permettre de satisfaire la demande pendant une période de maintenance corrective suite à une panne inattendue.

[Iravani et al. (2002) (106)] ont étendu le modèle précédent en considérant une demande stochastique. La demande qui n'est pas satisfaite à partir du stock est perdue et en résulte une pénalité. En outre, il est supposé que les caractéristiques du système de production change avec l'usage, plus le système se détériore, plus sa cadence de production diminue et plus ses opérations de maintenance deviennent plus longues et coûteuses. Dans un récent article, [Yao et al. (2005) (107)] supposent que le système de production peut produire à avec une cadence variable de 0 (inactif) à son taux maximal, s'il est en état de fonctionnement. En cas de panne, une maintenance corrective est effectuée immédiatement pour restaurer le système à l'état de fonctionnement. Les pannes du système ainsi que la durée des maintenances préventive et corrective sont supposées stochastiques. Ainsi, en plus des coûts directs dus aux maintenances préventives et correctives, des coûts indirects sont subis à cause de la production perdue due à l'indisponibilité du système durant les opérations de maintenances.

Pour maintenir un stock, [Tapas et al. (1999) (108)], ont utilisé la politique (S, s) , qui consiste à arrêter la production quand le niveau de stock tampon atteint le niveau S , et de la reprendre quand le niveau de stock descend au niveau s . ils ont supposé qu'une demande externe à produire arrive suivant un processus de poisson. Le retard de commande n'est pas autorisé. Le temps de production unitaire, le temps entre les pannes, et le temps de réparation suivent des distributions de probabilité. La maintenance préventive n'est réalisée que quand le stock tampon atteint le niveau S , et elle dépend du niveau du stock et du nombre d'items produits depuis la dernière réparation. L'objectif est de déterminer la date de la maintenance préventive afin d'améliorer la performance du système.

Une approche différente traitant la planification de la maintenance intégrée à la production avec stock tampon a été proposée par [Chelbi et al. (2004) (109)]. Ils ont supposé

que la maintenance préventive est effectuée régulièrement tous les T périodes de temps, et la durée des maintenances préventives et correctives sont aléatoires. La stratégie consiste à construire un stock tampon de taille S qui couvre au moins la consommation moyenne durant les périodes des réparations suivant des pannes subit à l'intérieure de la période de longueur T . Lorsque l'unité de production doit être arrêtée pour entreprendre les actions de maintenance préventive planifiées, un certain niveau de stock tampon doit être encore disponible afin d'éviter un arrêt de la ligne d'assemblage ultérieure. Les deux variables de décisions sont la période T au bout de laquelle la maintenance préventive doit être effectuée et le niveau S de stock tampon à construire.

5.4.4. Modèle d'optimisation des taux de production et de la maintenance

[Kenné et al. (2007) (110)] ont étudié l'effet de la politique de maintenance préventive et l'âge de la machine sur le niveau du stock de sécurité optimale. Surtout que l'âge de la machine augmente, la construction d'un niveau de stock significatif permet de faire face aux pannes aléatoires. L'objectif de l'étude est de déterminer quand doit on effectuer une maintenance préventive, ainsi que le niveau su stock de sécurité à maintenir.

6. Conclusion

Au terme de cette revue bibliographique sur les notions de l'intégration de la fonction maintenance et la fonction production. On a traité de l'interaction entre la maintenance et la production dans plusieurs catégories, à savoir : le coût des temps d'arrêt, la maintenance des opportunités. Nous distinguons également les études portant sur les aspects de maintenance en fonction des exigences de production, les études portant sur la planification de la production de la maintenance et les études intégrant les décisions de la production et de la maintenance.

CHAPITRE III

L'optimisation de la maintenance préventive.

1. Introduction

Elaborer un plan de maintenance préventive, c'est lister et décrire toutes les opérations de maintenance préventive qui devront être effectuées sur chacun des composant d'un équipement. Les opérations de maintenance se font sur les éléments de l'équipement en tenant compte de son utilisation, de sa technologie, de son risque de défaillance et de son impact sur la production et sur la sécurité (humaine, produit fini et matérielle).

Ce chapitre aborde, dans une première partie, les méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance et la comparaison entre les techniques de la maintenance corrective et préventive, dans une deuxième partie la nécessité de mettre en place des indicateurs de performances techniques pour suivre un plan de maintenance préventive en vue de son optimisation. Puis, on se concentre sur l'optimisation de la stratégie de la maintenance basé sur la fiabilité (OMF), nous établirons aussi un modèle analytique qui sera comme un outil d'aide à la décision du choix de la stratégie à adopter par l'exploitation et l'amélioration de la méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur Fiabilité (MBF) ainsi que la méthode Total Productive Maintenance (TPM).

2. État de l'art sur l'optimisation de la maintenance préventive.

En générale, les modèles d'optimisation de la maintenance incluent les modèles mathématiques axés sur la recherche d'un équilibre optimal entre les coûts et les avantages de la maintenance, ou le moment le plus approprié pour l'exécuter. La base de tout modèle d'optimisation de la maintenance repose sur le processus de détérioration des équipements et le comportement en cas de défaillance du composant. Au cours des dernières décennies, les modèles d'optimisation de la maintenance ont fait l'objet d'une attention croissante et constituent à présent un domaine de recherche bien établi. Ce chapitre présente un bref aperçu des modèles d'optimisation de la maintenance préventive existants. Plusieurs modèles et méthodes fiables dans ce domaine sont discutés et les perspectives futures étudiées.

Selon [Dekker et al. (1996) (135)], [Sandve et al. (1999) (136)], l'intérêt pour le développement et la mise en œuvre et l'optimisation de la maintenance a débuté au début des années 1960 par des chercheurs tels que Barlow, Proschan, Jorgenson, McCall, Radner et Hunter. Les modèles bien connus issus de cette période sont les modèles de remplacement par âge et par blocs. Dans les modèles de type d'âge, le moment de la maintenance dépend de

l'âge du système. Toutefois, pour les modèles de type bloc, le moment de la maintenance est connu à l'avance, il ne dépend ni de l'âge ni de l'état du système [Boschian, V et al. (2009) (137)]. Un modèle d'optimisation de la maintenance est un modèle mathématique (stochastique) qui vise à quantifier les coûts et à trouver le meilleur équilibre entre le coût de la maintenance d'un côté et le coût (bénéfice) associé de l'autre [Sandve et al. (1999) (136)].

L'optimisation de la maintenance est l'un des problèmes les plus critiques en production car la défaillance d'un système en cours de fonctionnement peut être un événement coûteux et dangereux. Lorsqu'un ordinateur ne fonctionne pas dans un système, cela retarde non seulement le temps d'exécution des opérations qui lui sont affectées, mais affecte également toutes les autres opérations planifiées dans le système. Par conséquent, les travaux ne peuvent pas être terminés à temps et cela induira des pénalités et une mauvaise réputation pour l'entreprise [Chung, S.H et al. (2009) (138)]. Ce processus d'optimisation peut utiliser différentes méthodes. Cela peut être réalisé en ajoutant des fonctionnalités et des conditions qui rendent la politique de maintenance plus réaliste, par exemple en tenant compte des conditions de travail, du calendrier de production du secteur, des problèmes de sécurité, des actions parfaites et imparfaites. Généralement, les modèles d'optimisation de la maintenance sont classés en fonction de la manière dont ils sont décrits et représentent la variabilité naturelle et l'incertitude sous forme de paramètre, de modèle et de scénario. L'utilisation de méthodes déterministes ne fournit pas d'informations sur les risques potentiels, ce qui entraîne une planification de la maintenance non optimale pour les usines de traitement. Cependant, les modèles probabilistes utilisent des distributions de probabilité pour décrire et représenter la variabilité naturelle et l'incertitude dans différents cas [Ghosh, D et al. (2009) (139)].

Parmi les différents types de politique de maintenance, la maintenance préventive (PM) est largement appliquée dans les grands systèmes tels que les systèmes de production, les systèmes de transport, etc. La MP consiste en un ensemble d'actions de gestion, administratives et techniques visant à réduire l'âge des composants afin améliorer la disponibilité et la fiabilité d'un système (réduction de la probabilité de défaillance ou du niveau de dégradation d'un composant du système). Ces actions peuvent être caractérisées par leurs effets sur l'âge du composant : le composant devient « comme neuf », son âge est réduit ou son état est légèrement affecté uniquement pour assurer les conditions de fonctionnement nécessaires, le composant semble être « aussi mauvais que vieux ». Le PM correspond aux

actions de maintenance effectuées lorsque le système est en fonctionnement. Cependant, les actions qui surviennent après la panne du système sont regroupées sous le titre de maintenance corrective (CM). Certaines des principales dépenses engagées par l'industrie sont liées au remplacement et à la réparation de machines de fabrication dans les processus de production. Le MP est une approche principale adoptée pour réduire ces coûts. [Samrout, M et al. (2009) (140)]. Bien que la CM ait une influence directe sur les composants d'un système, elle n'a pas été suffisamment étudiée. Récemment, des études ont commencé à être consacrées à l'optimisation des stratégies de gestion de la performance. Traditionnellement, les calendriers d'intervention optimaux des particules étaient obtenus à l'aide de modèles qui impliquent une minimisation des coûts engendrés par les activités de maintenance.

Dans un grand nombre de domaines (aéronautique, nucléaire, etc.), il est nécessaire de prouver en amont la performance de la stratégie de maintenance choisie. Ces preuves nécessitent de disposer d'un modèle de maintenance permettant d'estimer l'impact d'une décision de maintenance sur l'exploitation future du système. Le développement des modèles de maintenance a fait l'objet de nombreux travaux et a donné lieu à la publication d'articles de synthèse largement référencés d'après [Dekker, R et al. (1996) (111)], [Scarf, P.A et al. (1997) (112)] et, [Wang, H. (2002) (113)]. Par exemple, l'auteur de l'article [Wang, H. (2002) (113)] a examiné les principales stratégies de maintenance existantes pour des systèmes à un ou plusieurs composants. Depuis 1950, beaucoup de travaux de recherche ont porté sur la modélisation de la maintenance dans le but de minimiser les coûts de maintenance et maximiser la durée de bon fonctionnement des systèmes de production d'après Wang, H. (2002) [113]. La plupart des travaux en modélisation et en optimisation de la maintenance font l'hypothèse que l'état du système est connu en permanence. On peut distinguer deux classes de modèles de maintenance :

(1) modèles de maintenance pour des systèmes dont les durées de vie sont connues.

(2) modèles de maintenance pour des systèmes dont la dégradation est connue. Les modèles de maintenance pour des systèmes dont les durées de vie sont connues reposent sur la connaissance du temps de bon fonctionnement du système pour la détermination des dates de remplacement. On différencie deux familles de stratégies de maintenance basées sur la connaissance du temps de bon fonctionnement du système et les stratégies de maintenance type âge et type bloc. Ces stratégies se distinguent par la prise en compte de l'historique de

défaillances du système dans la détermination des dates de maintenance. La stratégie de maintenance type âge, introduite initialement par [Barlow, R.E et al. (1965) (114)], suggère de remplacer le système à la panne ou après T temps de bon fonctionnement. La stratégie de maintenance type bloc, introduite initialement par [Nakagawa et al. (1979) (115)], suggère de remplacer le système après une période prédéterminée de temps ($T, 2T, \dots$) indépendamment de l'âge et de l'état du système. Les modèles de maintenance pour des systèmes à dégradation connue reposent sur la connaissance du niveau de dégradation du système pour prendre des décisions de maintenance.

De nombreuses études proposent les stratégies optimisées de gestion de la performance alors qu'elles considéraient la MC comme un échec minimum. [Hsu Hsu, L.Fet al. (1999) (141)] a développé un modèle analytique pour l'optimisation conjointe des stratégies de maintenance préventive et de remplacement dans un système de production en file d'attente avec une réparation minimale en cas de défaillance. On considère une politique qui appelle une opération de maintenance préventive chaque fois que N parties ont été traitées. En cas de panne et si au moins K opérations de maintenance préventive ont été effectuées, le système est remplacé par un nouveau. Sinon, une panne est gérée par une réparation minimale. Un modèle analytique est développé et l'argument de la théorie du renouvellement-récompense est utilisé pour fournir un bénéfice attendu par unité de temps à long terme pour une politique de maintenance et de remplacement donnée.

Sous le titre d'optimisation des particules, [Tsai et al. (2001) (142)] ont présenté des MP périodiques d'un système à composants détériorés. Deux activités, simple MP et remplacement préventif, sont simultanément considérées pour organiser le programme de MP d'un système. La combinaison optimale d'activités permet de déterminer l'action ou les actions requises pour les composants de la MP sur chaque étape en utilisant des algorithmes génétiques et en recherchant une maximisation de la durée de vie du coût unitaire du système. L'effet CM n'est pris en compte que du point de vue des coûts. Le même problème se répète avec [Park et al. (2000) (143)] tenté de minimiser le coût d'une politique de maintenance périodique d'un système sujet à une dégradation lente. Chaque opération de la MP soulage temporairement le stress et ralentit donc le taux de dégradation du système, tandis que le taux de risque du système augmente de façon monotone. Le nombre et la période optimaux pour la PM minimisant le taux de coût prévu par unité de temps sur une durée infinie sont obtenus.

[Levitin et al. (2000) (144)] ont généralisé un problème d'optimisation de la maintenance préventive aux systèmes multi-états, qui présentent une gamme de niveaux de performances. La fiabilité d'un système multi-états est définie comme la capacité de satisfaire une demande donnée. La fiabilité des éléments du système est caractérisée par leurs fonctions de risque, Un algorithme est développé qui obtient la séquence des actions de maintenance fournissant au système le niveau de fiabilité souhaité pendant toute sa durée de vie avec un coût de maintenance minimal.

Les stratégies MP classiques contiennent généralement le même intervalle de temps pour les activités MP et sont souvent appliquées avec des modes de défaillance connus. Le même intervalle de temps donnera inévitablement une diminution de la fiabilité des activités de gestion de la performance pour les systèmes de dégradation à effet de particules imparfaites, et les modes de défaillance connus peuvent être inexacts dans la pratique. Pour éviter ce problème, [Zhao (2003) (145)] a présenté une politique de PM avec le niveau de fiabilité critique. En supposant que le système après une action PM commence un nouveau processus d'échec, un paramètre appelé taux de dégradation est introduit pour représenter l'effet imparfait. Selon la loi, il y a le même nombre de défaillances dans les intervalles de temps de divers cycles de composantes et le même taux de dégradation pour la fiabilité.

[Bartholomew-Biggs et al. (2006) (146)] ont présenté une formulation du problème de planification des MP qui permet de traiter le nombre d'opérations comme une variable d'optimisation continue. Cette formulation implique la minimisation globale d'une fonction de performance. Les auteurs considèrent des modèles et des algorithmes de solution pouvant être utilisés pour déterminer des planifications de MP optimisant une mesure des performances du système.

Afin de résoudre un problème d'optimisation de la maintenance pour un système en série, [Duarte et al. (2006) (147)] ont développé un algorithme permettant de déterminer la fréquence optimale pour effectuer une maintenance préventive dans les systèmes présentant des taux de risque, afin de garantir sa disponibilité.

Beaucoup de programmes de MP mis en application, donnent des résultats jugés insuffisants et en dessous des espérances. Ces résultats quelques peu décevants n'ont pas été provoqués par la limitation de la technologie, mais plutôt par deux problèmes importants

concernant respectivement, la gestion et le financement notamment [Enrique, C et al. (2008) (148)] :

- Un problème purement organisationnel, logistique et culturel : sa mise en oeuvre dans l'entreprise,
- Un problème financier et politique : le financement de l'approfondissement des connaissances sur le comportement vibratoire des machines en phase de vieillissement, le financement du développement des outils de surveillance et de diagnostic et des techniques d'investigation sur lesquelles elles reposent.

Les différentes démarches d'optimisation de la maintenance, ont pour but de sélectionner les tâches de maintenance en se basant sur des études du retour d'expérience, [Harish, D et al. (2003) (149)]. De nouvelles méthodes d'optimisation de la maintenance sont développées suite à l'importance du processus de maintenance et de son impact sur la rentabilité et les coûts d'exploitation des équipements [Retour, D et al. (1990) (150)].

3. Conclusion.

L'optimisation d'une stratégie de maintenance consiste à trouver les dates optimales d'interventions pour exécuter la maintenance (préventive ou corrective) tout en respectant les objectifs fixés. Ces dates sont déterminées de manière à optimiser un critère de décision donné. Ce critère de décision peut être aussi bien le coût que la disponibilité du système ou encore sa fiabilité ou d'autre indice tel que la sécurité. Ces critères sont liés à la durée d'exploitation du système.

L'optimisation de la maintenance consiste à trouver la balance entre les actions de maintenance préventive et corrective tout en respectant des objectifs préalablement fixés (Minimisation des coûts, maximisation de la disponibilité, etc..).

Selon l'étude bibliographique faite, il existe actuellement de nombreux modèles qui illustrent les différentes hypothèses posées sur l'équipement, son mode de défaillance, de dégradation, les exigences et les objectifs de la maintenance. Pour un équipement, dont l'évolution est décrite par un processus aléatoire, la construction de la politique de maintenance se ramène à la caractérisation d'une structure paramétrique de maintenance. Dans le cas où la seule information disponible sur l'équipement est sa durée de vie, une

politique de maintenance basée sur la fiabilité de fonctionnement maximale est très bien adaptée.

Compte tenu des enjeux et du contexte industriel, des recherches bibliographiques ont été effectuées dans le but d'identifier les méthodes appliquées à la modélisation des stratégies de maintenance, les techniques et outils associés, et les problématiques traitées. Il en résulte que de nombreux travaux visent à améliorer la disponibilité des équipements et négligent l'amélioration de la stratégie de gestion et d'évaluation des performances de maintenance

L'examen de la littérature a permis de conclure que la plupart de la littérature traitait de solutions d'optimisation dans des environnements statiques. Cependant, dans le monde d'aujourd'hui caractérisé par une évolution rapide des demandes, une concurrence élevée et des exigences de maintenance élevées, il sera de plus en plus difficile de maintenir de bonnes performances lors de l'utilisation des techniques de solution statique existantes. La recherche dans le domaine de l'optimisation de la maintenance devrait maintenant s'orienter vers le développement de modèles de gestion, Dans ce contexte, il est conseillé de développer Modèles d'optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité et des approches qui optimisent simultanément les politiques de maintenance et différents aspects des tâches de gestion.

4. Comparaison entre la maintenance corrective et celle préventive

Concernant la première forme, la défaillance engendre souvent des avaries en chaîne et des dégâts importants, les réparations sont effectuées dans des conditions difficiles puisque imprévues. Les contrôles des temps sont délicats, et le maintien d'un taux de disponibilité suffisant de l'installation n'est possible qu'au prix de la redondance du matériel, de l'existence d'un stock de rechange important ou de l'assurance de la disponibilité de ces rechanges, de la présence de personnel qualifié pour les interventions (coût de la main-d'œuvre élevés d'heures supplémentaires). L'analyse des coûts d'entretien a prouvé que dépanner en mode réactif (après la panne) sont normalement trois fois plus grands que même dépanner sur une base programmée [Ming, T et al. (2011) (151)]. Pour pallier à cet inconvénient, l'installation peut être organisée en modules que l'on remplace par « échange standard » en cas de défaillance. Le nombre d'interventions reste en revanche faible.

Pour le second cas ; le taux de défaillance est faible puisque les défaillances prévisibles sont théoriquement éliminées, les interventions sont programmées dans le temps, ce qui améliore la gestion du personnel et des rechanges nécessaires ainsi que l'adéquation des opérations de maintenance avec les impératifs commerciaux :

- Bonne planification des opérations et des ressources,
- Contrôle du niveau de stockage des pièces de rechange.

Le nombre et la durée des interventions sont élevés et le remplacement systématique d'éléments ayant encore un bon potentiel n'est pas rare (l'entretien n'est pas fonction de l'état de la machine, mais plutôt de la durée d'utilisation). Enfin, la multiplication des interventions augmente le risque d'erreurs humaines susceptible d'être à l'origine d'une nouvelle avarie.

De nombreux facteurs entrent en jeu. Nous discutons ici des avantages et des inconvénients de la maintenance et du correctif préventif.

4.1. Maintenance corrective

➤ **Avantages :**

- frais de démarrage réduits.
- personnel limité.
- augmenté les marges d'intervention.

➤ **Inconvénients :**

- imprévisibilité ;
- équipement non maximisé ;
- coûts indirects très élevé ;

4.2. Maintenance préventive

La maintenance préventive peut être définie comme suit :

« Actions exécutées selon un calendrier basé sur le temps ou sur une machine qui détecte, empêche ou réduit la dégradation d'un composant ou d'un système dans le but de maintenir ou d'étendre sa durée de vie niveau. »

➤ **Avantages :**

- Réduit les pannes et donc les temps d'arrêt ;
- Effectuée de façon régulière et mise en place grâce à des critères préalables ;
- Réparer et réduire au fil du temps des équipages ;
- Plus grande sécurité des travailleurs ;
- Réduction des coûts de maintenance et de réparation ;
- Moins de matériel de secours et de pièces de rechange ;
- Meilleure qualité du produit et moins de retouches et de rebuts ;
- Augmente la durée de vie de l'équipement ;
- Augmente les chances d'avoir une cadence de la production très élevée ;

➤ **Inconvénients :**

- Maintien de la maintenance en fonction du calendrier non requis
- Risque d'endommagement lors d'un entretien inutile
- N'est pas facilement visible

Bien que la maintenance préventive ne soit pas le programme de maintenance optimal, elle présente plusieurs avantages par rapport à la maintenance corrective. En effectuant la maintenance préventive envisagée par le concepteur du matériel, nous prolongerons la durée de vie de l'équipement au plus près de la conception. Cela se traduit par des économies en argent. Maintenance préventive (lubrification, changement de filtre, etc.). Bien que nous n'empêchions pas les pannes catastrophiques, nous réduirons le nombre de pannes. La réduction des pannes se traduira par des économies de maintenance et de coûts en capital.

4.3. Maintenance prédictive

La maintenance prédictive peut être définie comme suit : Mesures qui détectent le début de la dégradation du système, permettant ainsi d'éliminer ou de contrôler les facteurs de stress causal avant toute détérioration significative de l'état physique du composant. Les résultats indiquent les capacités fonctionnelles actuelles et futures.

➤ Avantages

- Augmentation de la durée de vie / disponibilité des composants.
- Permet des actions correctives préventives.
- Diminution du temps d'équipement ou de processus.
- Diminution des coûts des pièces et de la main-d'œuvre.
- Meilleure qualité du produit.
- Amélioration de la sécurité des travailleurs et de l'environnement.
- Amélioration du moral des travailleurs.
- Économies d'énergie.

➤ Inconvénients

- Investissement accru dans les équipements de diagnostic.
- Investissement accru dans la formation du personnel.
- Potentiel d'épargne pas facilement perceptible par la direction

Les avantages de la maintenance prédictive sont nombreux. Un programme de maintenance prédictive bien conçu éliminera pratiquement toutes les défaillances catastrophiques des équipements. Nous serons en mesure de planifier les activités de maintenance pour minimiser ou supprimer les coûts liés aux heures supplémentaires. Nous serons en mesure de minimiser les stocks et de commander les pièces, au besoin, bien à l'avance pour répondre aux besoins de maintenance en aval. Nous pouvons optimiser le fonctionnement de l'équipement, économiser de l'énergie et augmenter la fiabilité de l'installation. Des études antérieures ont estimé qu'un programme de maintenance prédictive

fonctionnant correctement peut permettre une économie de 8% à 12% par rapport à un programme utilisant uniquement la maintenance préventive. En fonction de la dépendance de l'installation vis-à-vis de la maintenance corrective et de l'état des matériaux, elle pourrait facilement reconnaître des possibilités d'économies supérieures à 30% à 40%. En fait, des enquêtes indépendantes indiquent les économies moyennes industrielles résultant de l'instauration d'un programme de maintenance prédictive fonctionnel :

- Retour sur investissement : 10 fois
- Réduction des coûts de maintenance : 25% à 30%
- Elimination des pannes : 70% à 75%
- Réduction des temps d'arrêt : 35% à 45%
- Augmentation de la production : 20% à 25%.

5. Choix de la politique de maintenance

Vu que la maintenance exige une combinaison rationnelle des moyens et qu'elle est permanente, elle nécessite une politique préalablement établie. Les travaux de recherche dans le domaine maintenance ont pour objectif de définir une politique de maintenance préventive basée sur l'utilisation d'outils adéquats et adaptée à un système mécanique complexe. Cette politique de maintenance permettra ainsi à l'équipe de surveillance de diagnostiquer les défauts apparaissant sur le système en fonctionnement, et de décider des interventions de réparation [Ewald, F et al. (2002) (152)], comme il est montré sur la (figure III.1).

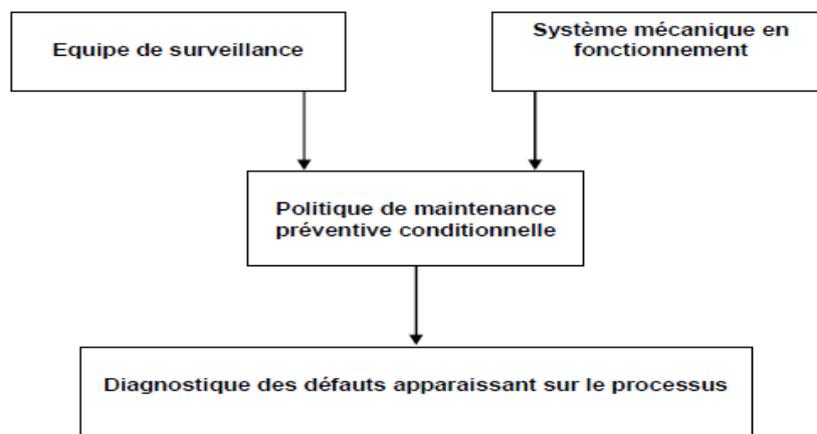


Figure III.1: Fonction globale de politique de maintenance préventive

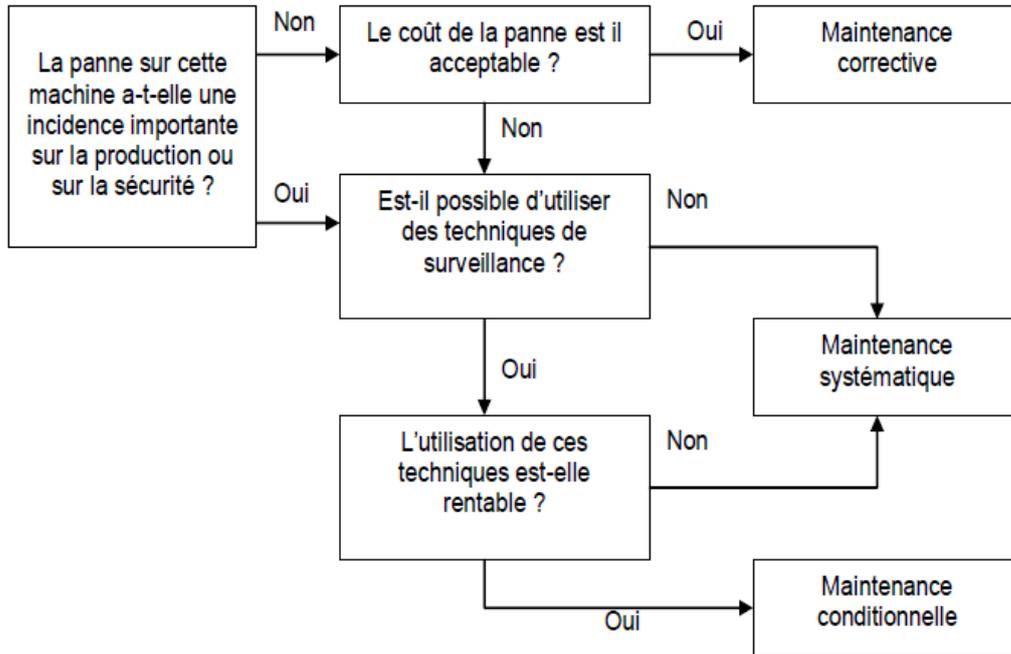


Figure III.2 : Choix d'une politique de maintenance

6. Objectifs visés par la maintenance préventive

La mise en œuvre d'une stratégie de maintenance préventive, nécessite les analyses techniques du comportement de système et leurs composants matériels. Cela permet à la fois de pratiquer une maintenance préventive optimale et de supprimer complètement certaines défaillances, dans le but d'améliorer la fiabilité des composants matériels de système industriel. Les objectifs de la mise en exploitation de ces méthodes de maintenance conditionnelle sont divers [Lung B et al. (2003) (153)], et peuvent :

Garantir une bonne qualité des produits: La qualité des produits est assurée avec l'augmentation du rendement. Cela est basé sur la surveillance quotidienne pour détecter les symptômes de défaillance et veiller à ce que les paramètres de réglage et de fonctionnement soient respectés.

Améliorer l'ordonnancement des travaux: La garantie de fonctionnement sans interruption lourde permet d'envisager une réduction des encours de production, et une diminution du nombre d'arrêts de production intempestifs. Cela implique une bonne coordination entre les deux services (production et maintenance) pour la planification des interventions et le respect du planning Vassiliadis, C.G. et al. (2000) (154) [8].

Assurer la sécurité humaine et la sûreté de fonctionnement: La préparation des interventions de maintenance préventive ne consiste pas seulement à respecter le planning; elle doit tenir compte des critères de sécurité pour éviter les imprévus dangereux.

Améliorer la gestion des stocks: La surveillance rapprochée permet le fonctionnement d'organes aux maximums de leurs durées de vie évitant ainsi la dépose et le rebut d'éléments ayant la capacité de rendre service. Ainsi, il en ressort une diminution sensible des stocks nécessaires de pièces de rechange, avec un approvisionnement des selon les besoins réels c'est à dire juste à temps.

Améliorer le climat de relations humaines : Une panne imprévue est souvent génératrice de tension. Le dépannage doit être rapide pour éviter la perte de production. Certains problèmes, comme par exemple le manque de pièces de rechange, entraîne l'immobilisation de la machine pendant longtemps, ce qui provoque une tension entre la production et la maintenance. En outre, la maintenance préventive conditionnelle valorise et motive le personnel du service par l'utilisation de techniques modernes pratiquées avec du matériel de haute technologie qui concoure à des interventions plus ciblées et bien organisées par la localisation préalable des pannes [Lyons, M et al. (2004) (155)].

Réduction du coût global de la maintenance : La maintenance conditionnelle a pour principal objectif l'amélioration et l'augmentation de la disponibilité des équipements. Pour cette forme de maintenance, les arrêts systématiques sont supprimés et l'augmentation du rendement est plus sensible. Le cout global de la maintenance est allégé car, la surveillance permet de déceler les petits défauts de conception ou de fonctionnement, de plus, l'observation de l'évolution d'une dégradation évite les destructions d'organes voisins par défaillance secondaire. Le risque de casses importantes et traumatisantes pour l'ensemble d'une machine, étant écarté, la durée de vie des systèmes est allongée.

6.1. Mise en œuvre d'une maintenance préventive

La mise en place d'un programme de maintenance préventive et sa pérennité nécessitent une préparation minutieuse (figure III.3) l'étude de faisabilité, le choix des acteurs et le démarrage du programme. La méthodologie de la mise en oeuvre d'une MP est proposée, en plusieurs étapes successives qui permettent de poser le problème de la PM à partir d'une défaillance à prévenir avant de choisir les matériels nécessaires, d'organiser la surveillance :

- Sélection des défaillances à prévenir,
- Sélection d'un (ou n) paramètre physique descriptif de l'évolution du défaut,
- Choix du mode de collecte des informations,
- Suivre le paramètre descriptif dans le temps à l'aide de courbes de tendance
(Maintenance continue ou périodique, périodicité à définir),
- Choix du traitement de l'information,
- Établir des seuils limites d'avertissement (pré- alarme),
- Établir le diagnostic de défaut,
- Prédire la date de bris (extrapolation de courbes),
- Commander les pièces de rechange,
- Organisation de l'intervention préventive conditionnelle,
- Bilan d'efficacité et retour d'expérience.

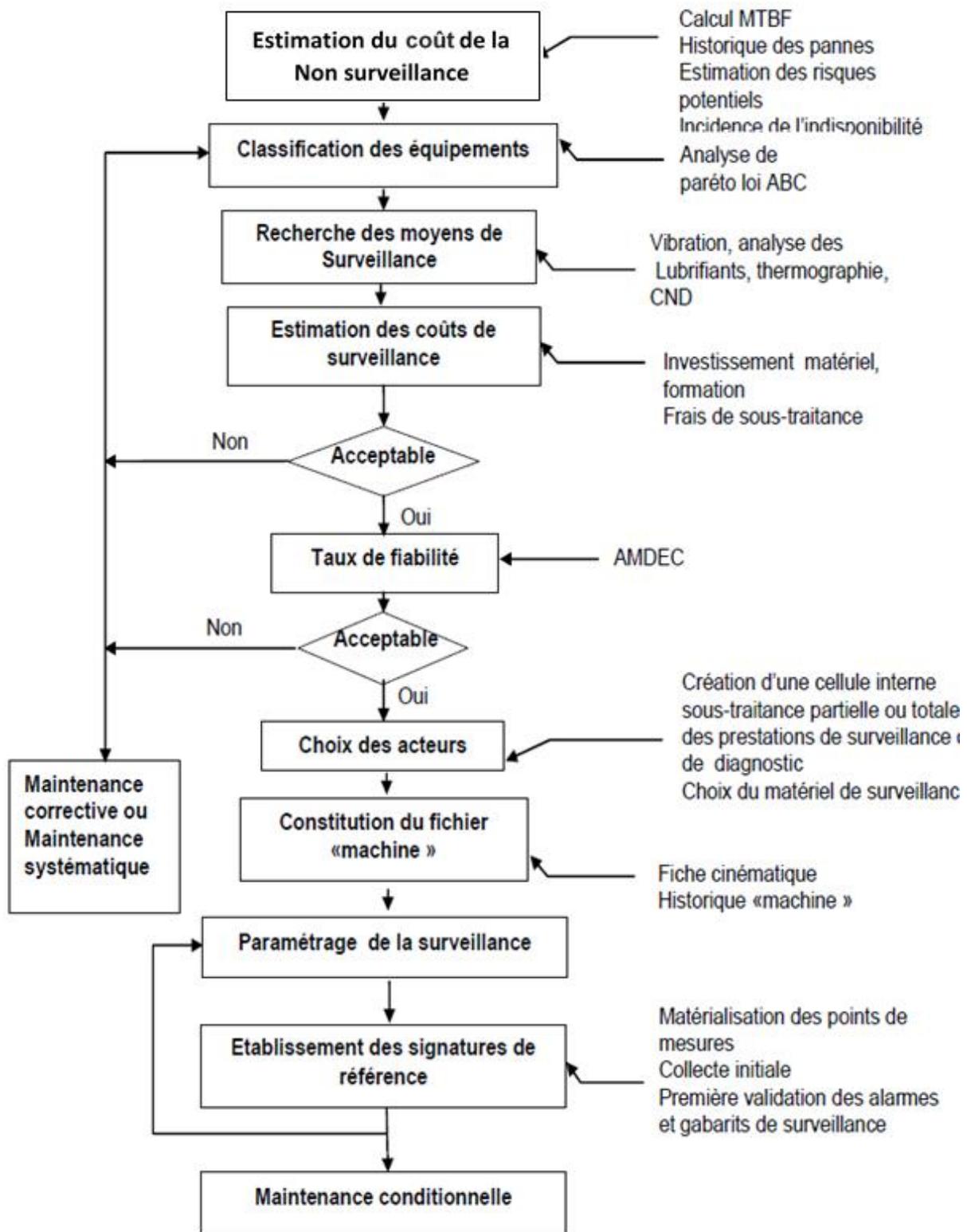


Figure III.3 : Chemin logique de la mise en œuvre d'une maintenance préventive

7. Optimisation de la maintenance basée sur la fiabilité (M.B.F)

7.1. État de l'art de la maintenance basée sur la fiabilité

Dans ce chapitre, on illustre une présentation de la démarche connue par Maintenance Basée sur la Fiabilité MBF ; qui peut nous s'orienter vers l'optimisation des actions de maintenance préventives basée principalement sur l'évolution des anomalies lors de l'exploitation, ou encore sur les modèles de survies des entités critiques qui nécessitent un plan optimal de maintenance. La finalité de la démarche est de cibler les actions de maintenance à mettre en place pour une rentabilité optimale.

Contrairement aux différents processus d'optimisation de la maintenance marginaux, développés au fil des années dans l'industrie, la MBF est le seul processus capable de s'attaquer efficacement aux sujets complexes de la maintenance tels le choix du contenu et de la périodicité des tâches de maintenance préventive et ceci grâce aux méthodes et outils sophistiqués dont elle dispose. Longtemps considérées comme des privilèges pour les spécialistes de la fiabilité, les AMDEC, la maintenance prévisionnelle et les méthodes statistiques représentent les ingrédients principaux de la MBF et de ses différentes variantes.

Toutefois, cette méthodologie a atteint des limites avec ses objectifs assez ambitieux tels que préserver le niveau de la fiabilité opérationnelle d'un équipement asymptotique à son niveau de fiabilité intrinsèque. Il manque à la MBF l'intégration de plusieurs activités connexes essentielles au suivi continu de la fiabilité des équipements au sein d'un système de gestion des biens suffisamment large et complexe (Exemple : Le suivi de la performance des composants et des systèmes).

Dans ce qui suit, l'échelle de l'évolution de la MBF sera dressée depuis sa première forme classique jusqu'à l'approche basée sur le processus de fiabilité des équipements en passant par les différentes variantes adoptées dans l'industrie.

7.2. Différentes approches de la MBF

Durant ces dernières décennies, la maintenance a été parmi les disciplines les plus touchées par les changements. La maintenance a toujours été considérée comme un poste de dépenses dans l'industrie. Son rôle a longtemps été réduit aux activités de dépannage ou à l'entretien, rarement considéré comme une activité stratégique. Depuis longtemps, la

maintenance a manqué de méthodologie d'approche et cette discipline a produit plusieurs perceptions critiques impliquant des résultats médiocres.

Plusieurs contraintes, liées aux exigences de la baisse des coûts de production des biens et des services, ont donc incité les dirigeants et les ingénieurs de la maintenance à changer leurs manières de penser et d'agir ces dernières décennies. Toutefois les limitations du système traditionnel de la maintenance, indépendamment du degré d'informatisation, sont devenues apparentes obligeant ainsi les acteurs industriels et économiques à apporter un nouvel éclairage à cette fonction.

Cette discipline a évolué dans un sens favorable donnant ainsi naissance à plusieurs méthodes scientifiques d'optimisation mettant en cause le rôle, les politiques, les stratégies et les responsabilités de la maintenance.

À la fin de 1950, les approches traditionnelles de maintenance sont devenues inadéquates pour l'industrie aéronautique moderne de l'après-guerre. En effet, l'aviation civile américaine subissait environ 60 accidents par million de vols dont les deux tiers étaient dus aux défaillances des équipements. De nos jours, grâce à la MBF adoptée par l'aviation civile, on parle de deux accidents par million de vols, La MBF est l'une des méthodes approuvées issue de la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sûreté). Elle a démontré son efficacité comme processus d'optimisation de la maintenance dans les domaines aéronautique, spatial et nucléaire.

C'est principalement entre 1960 et 1980 que se sont développées les nouvelles philosophies de la maintenance dans l'aviation. Dans les années 60, les programmes d'entretien étaient fondés sur des périodicités fixes de réhabilitation de composants calculées empiriquement. Sous l'incitatif de la dégradation du niveau de sûreté des équipements, les responsables de la maintenance de l'aviation civile ont été poussés à travailler avec la FFA (Federal Aviation Administration) pour investiguer les comportements des défaillances pour les équipements complexes. Afin de rendre les programmes plus intelligents, le Maintenance Steering Group a été formé d'experts opérateurs et concepteurs d'aéronefs. Ainsi, l'association Industry transport air association a publié une série de rapports destinés à l'aviation civile pour initier les premières approches d'optimisation de la fiabilité: en 1968, il en a résulté la méthodologie MSG-1, puis en 1970 le MSG-2 appliquée au Boeing 747, laquelle est devenue MSG-3 en 1980.

En 1978, le département de la défense américaine, avec une motivation différente de celle de l'aviation civile et plutôt basée sur la réduction des coûts de maintenance, a mandaté un groupe d'ingénieurs : Stanley Nowlan et Howard Heap de United Airlines, pour compiler l'expérience de l'aviation dans les différents rapports qu'elle a publié. Depuis longtemps la théorie de la fiabilité utilise la courbe en forme de baignoire comme le modèle de référence. Les études de [Nowlan et Heap. (1978) (156)] démontrent que seulement 4 % des composants suivent cette règle et subissent une usure. D'autres modes de comportement ont alors été développés. Fait le plus remarquable, 68 % des composants ont une courbe montrant des problèmes de jeunesse au début, mais par la suite durant leur vie utile un taux de défaillance stable, par exemple les composants électroniques et les logiciels. Une méthodologie d'établissement de programmes d'entretien appelée MBF (maintenance basée sur la fiabilité) a alors été mise au point.

En 1980, l'augmentation importante des coûts de carburant et l'amélioration de la fiabilité des nouveaux composants ont exercé une pression sur l'aviation civile pour réviser encore ces anciennes approches. C'est devenu le MSG-3 [Air Transport Association (ATA), (2001) (157)], laquelle a utilisé l'approche logique de la MBF qui a pour objectif de répondre à la question suivante :

Que peut-on faire pour empêcher un équipement de tomber en panne ?

D'autre part, au début des années 90, les services militaires ont édité des normes standards militaires. Ces derniers ont pour but de guider et d'orienter les contractants et manufacturiers vers l'utilisation de la MBF pour développer les programmes d'entretien préventif pour les nouveaux équipements militaires. On pourrait citer les processus développés par le US Naval Air tels que le [Mil-std 2173 (1986) (158)], le [NA VAIR 00-25-403 (2001) (159)] et le processus décrit par le NES 45 et développé par [la British Royal Navy (1999) (160)].

Optimiser la maintenance et la fiabilité en se basant sur les trois étapes principales suivantes :

- L'analyse fonctionnelle et l'analyse des défaillances fonctionnelles.
- L'analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leurs criticités
(Conséquences)

- Le choix de la stratégie de maintenance en se basant sur la logique de décision de la MBF.

Dans la littérature, cette méthodologie a été reprise d'une manière exhaustive par deux pionniers dans le domaine :

- [John Moubray (1997) (161)], lui a attribué le nom « RCM 2 » après l'avoir ajusté en rajoutant les conséquences environnementales au diagramme décisionnel de la MBF. Dans son ouvrage, il explique en détails, et dans un ordre chronologique, les différentes étapes de la méthodologie ; précisément, ce qu'il ne faut pas faire pour réussir.

- [Gilles Zwinelstein (1996) (162)] a analysé la méthodologie « Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (OMF) » en la détaillant en 10 étapes et en se concentrant sur les différentes méthodes associées aux analyses de la MBF.

D'autre part, l'un des premiers secteurs à utiliser la méthodologie de la MBF, après l'aviation civile, est le secteur industriel grâce à ses similarités avec ce dernier en matière de risque et de sûreté. Il sera ainsi intéressant d'étudier l'intégration et l'évolution de la MBF au sein de ce contexte particulier.

7.3. Etudes basée sur l'optimisation de la maintenance par la fiabilité OMF

L'application des études d'optimisation de maintenance basée sur la fiabilité (OMF) passe par plusieurs étapes [Harish D et al. (2003) (172)] :

- L'analyse fonctionnelle (représentations du fonctionnement des systèmes étudiés)
- L'analyse de dysfonctionnement des systèmes (identification des modes de défaillance des équipements)
- L'analyse du retour d'expérience (rassembler les données essentielles pour établir les choix de maintenance)
- L'analyse des dysfonctionnements des équipements (fournir les informations nécessaires à l'évaluation de la criticité des modes de défaillances)

- La sélection des tâches de maintenance (proposition des tâches élémentaires justifiées pour couvrir le mode défaillance significatifs et écrire le programme de maintenance préventive)

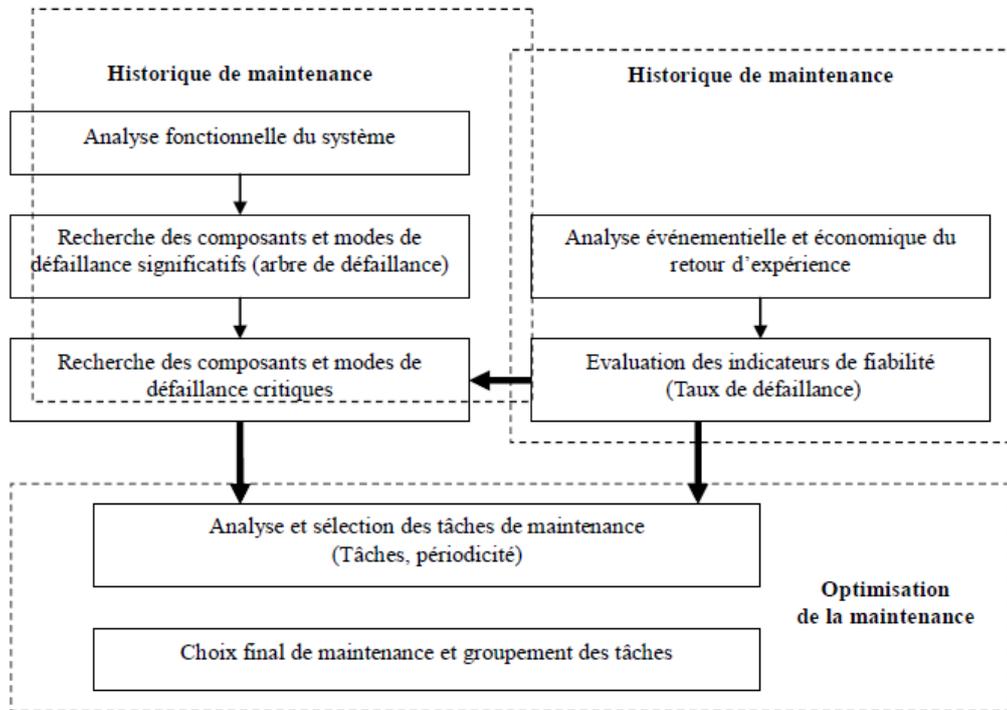


Figure III.4 : Méthode d'optimisation basée sur la fiabilité

Il est important d'ajouter aux anciens modèles qu'à partir du retour d'expérience (REX), on peut déterminer ce qui est passé aux équipements ou composants en termes de fiabilité (évaluation des indicateurs de fiabilité), disponibilité et coûts (l'analyse économique), et les actes de maintenance ou modification réalisées et par la suite on passe à l'étape d'analyse des tâches.

Durant la phase d'évaluation des risques on envisage les événements graves qui pourraient se passer, et on met en oeuvre les techniques d'analyse de fonctionnement et de dysfonctionnement pour prévenir les défaillances jugées grave et qui ont de forte chance de se produire, afin d'envisager des tâches de maintenance préventive. Durant la phase d'optimisation de la maintenance on détermine les tâches à effectuer ainsi que leurs fréquences de réalisation.

7.4. Présentation de la méthode

C'est une démarche rationnelle qui vise à limiter au mieux les conséquences des défaillances d'origine matérielle sur le fonctionnement d'une installation. Elle est basée sur l'analyse de la fiabilité des équipements et permet de déterminer d'après A. Riali et al. [125]:

- Où les actions préventives sont-elles nécessaires (sur quels matériels) ?
- Quelles sont les actions à effectuer ?
- Quand intervenir ?

➤ Les différentes phases de la démarche OMF

La démarche se décline en cinq phases :

Phase 1 : Formation d'un groupe OMF pilote :

C'est une équipe à laquelle tous les acteurs spécialisés doivent participer (maintenance, Production, qualité).

Phase 2 : 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 3 : 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 4 : la sélection des tâches de maintenances

Les phases précédentes ont permis de répondre a 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.

Phase 5 : 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

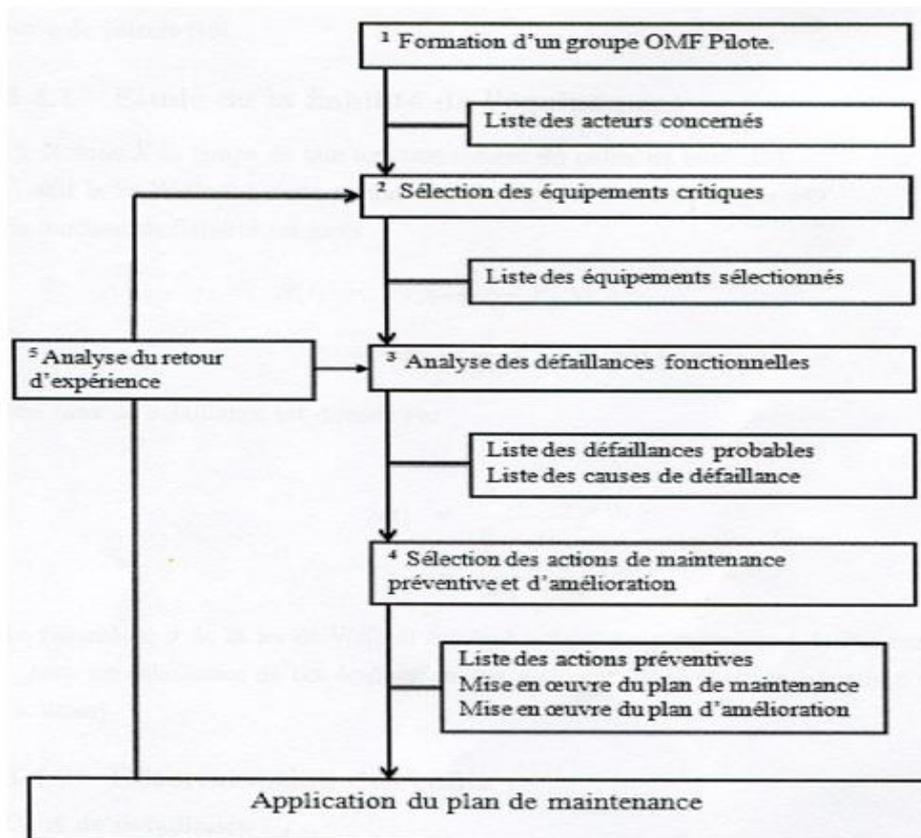


Figure III.5 : Les étapes de l'O.M. F

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.

7.5. Optimisation de la phase 3 (l'analyse des défaillances des matériels critiques) d'OMF

7.5.1. Modèles de gestion de la maintenance

Avec l'augmentation de la concurrence mondiale, les entreprises doivent répondre à des spécialisations internes pour des conditions du marché en termes de flexibilité, de

performance selon Yamashina, H et al. (1995) [126]. Dans l'environnement dynamique, un système de production fiable qui doit être considéré comme un facteur critique de compétitivité d'après Brah, S. A. et al. (2004) [127].

Des compétences organisationnelles insuffisantes dans la gestion efficace de la fonction de maintenance peuvent gravement compromettre la compétitivité en réduisant le débit, en augmentant les stocks et en réduisant les délais, Patterson, J.W et al. (1996) [128], ce qui a incité les principales organisations mondiales à adopter des stratégies de maintenance efficaces, parmi eux La maintenance conditionnelle (CM), la maintenance centrée sur la fiabilité (RCM) et la maintenance productive totale (TPM), par rapport aux approches traditionnelles de maintenance corrective.

7.5.2. Le modèle proposé de la gestion de maintenance

Le modèle de décision est structuré en trois étapes de base. Identification des problèmes, évaluation des composants critiques et décision de maintenance, comme illustré à la figure III.6 les détails de chaque étape sont décrits dans les sections suivantes. L'objectif principal du modèle proposé est de fournir une procédure étape par étape pour déterminer la périodicité de la PM en tenant compte de l'état actuel de la machine.

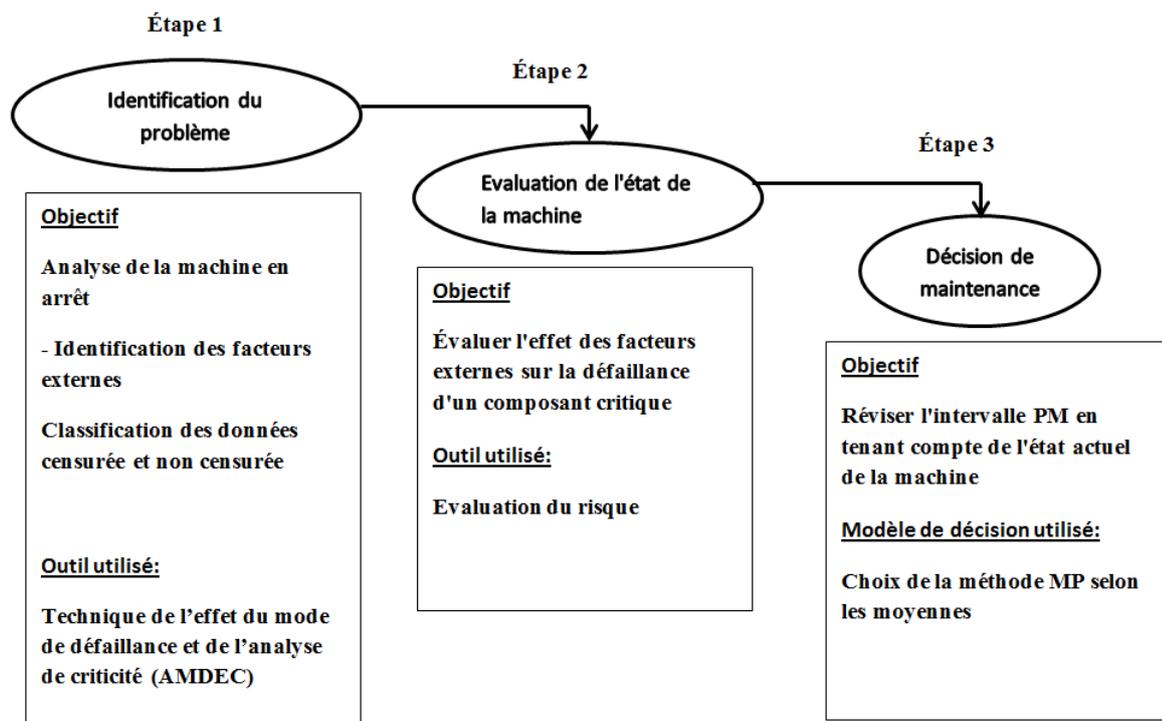


Figure III.6: Structure générale du modèle de décision de la gestion de maintenance.

7.5.2.1. Étape 1 : Identification du problème

Définir et comprendre le problème avec précision est la première étape importante du modèle proposé. En réalité, la défaillance du composant est la principale cause de panne de la machine. Une défaillance des composants entraînant des temps d'arrêt ou des coûts élevés (en raison d'une panne de la machine) est classée comme composant critique.

L'objectif de cette étape est d'effectuer une analyse sur le mécanisme de défaillance afin d'identifier les facteurs externes possibles qui contribuent à la défaillance du composant et de classer les données. Le processus de cette étape est illustré à la figure III.7. L'analyse du mécanisme de défaillance est effectuée à l'aide d'un outil connu. Analyse de mode de défaillances de leurs effets et de leur criticité AMDEC. Grâce à l'AMDEC, l'identification des facteurs externes possibles et la classification des données peuvent être effectuées systématiquement. La classification des données est basée sur des enregistrements de modes de défaillance et des calculs d'indice de criticité.

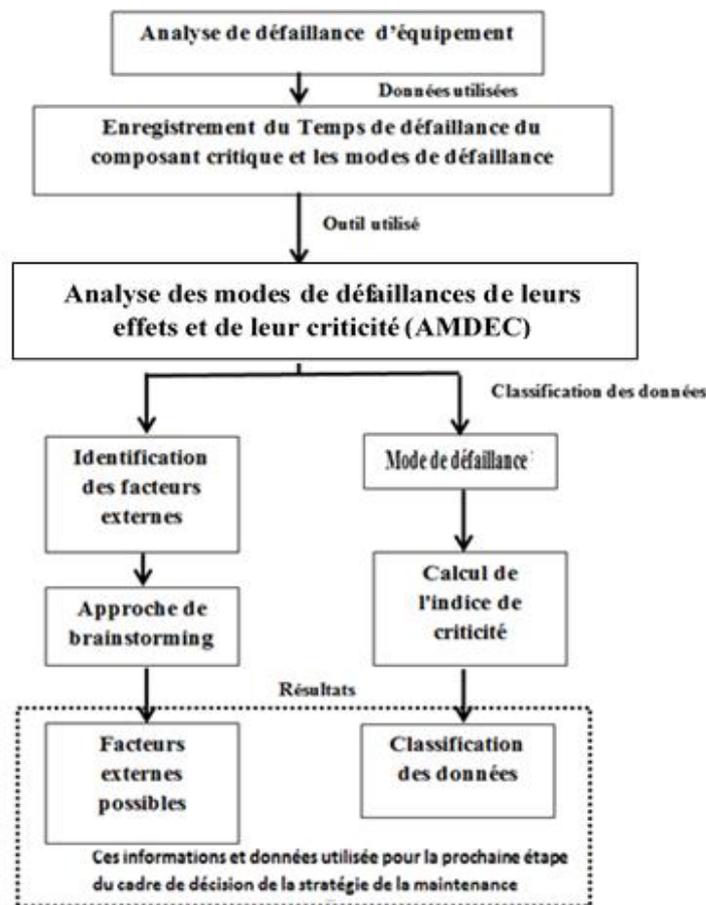


Figure III.7: Processus d'analyse du mécanisme de défaillance.

Les données utilisées dans la zone AMDEC sont les durées d'échec du composant critique ainsi que les enregistrements des modes de défaillance et les facteurs externes possibles qui contribuent à la défaillance du composant critique. L'identification de facteurs externes possibles est réalisée grâce à une approche de brainstorming entre experts tels que les techniciens de maintenance, les ingénieurs et les opérateurs d'expérience. Les informations (données) des identifiées et la classification des données censurée et non censurée seront ensuite utilisées pour une analyse ultérieure dans la prochaine étape du modèle proposé.

Ce modèle analytique est différent des autres modèles classiques parce qu'on va introduire les facteurs externes et la méthode de brainstorming qui est basée de tous les études qui sont faite au niveau des sites industriels.

7.5.2.2. Étape 2 : Évaluation des composants critiques

Dans cette étape, les facteurs externes possibles qui ont été identifiés à l'étape précédente ainsi que les données seront évaluées. En d'autres termes, déterminera les conditions de fonctionnement qui contribuent à la défaillance de la composante critique.

7.5.2.3. Étape 3 : Décision de maintenance

La décision de maintenance est la dernière étape du modèle proposé. Le premier processus consiste à tester les temps de défaillance du composant critique en termes de tendance et de corrélation. Le résultat de ce test est utilisé pour déterminer l'outil de modélisation.

7.5.3. L'évaluation des stratégies de maintenance OMF

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 sont 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 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, ...).

7.5.4. Retour d'expérience pour l'OMF

L'étude OMF est une méthode d'aide à la décision de la stratégie de maintenance à mener. Elle sollicite le bon sens, mais cela ne suffit pas, on a aussi besoin de données quantitatives pour appréhender les problématiques de maintenance d'un point de vue pragmatique.

Le retour d'expérience technique s'intègre donc dans le système d'information et dans le management des entreprises, et il est un point clé stratégique de la sûreté de fonctionnement industrielle. Le retour d'expérience n'est pas une fin en soi, mais un moyen contribuant à ces enjeux qui sont en somme, la maîtrise du matériel, et précisément :

- La sûreté et l'environnement ;
- La disponibilité ;
- La qualité du produit ;
- Les coûts de maintenance ;
- La durabilité et la prolongation de la durée d'exploitation ;
- L'aide à la conception des installations futures.

Les objectifs du retour d'expériences.

L'un des résultats des études OMF est l'établissement de programmes optimisés de maintenance préventive. Ces programmes sont ensuite appliqués. Ils doivent cependant être actualisés (il s'agit d'un processus en boucle), pour les raisons suivantes :

- L'archivage des études OMF réalisées précédemment assurant la traçabilité des analyses et leur réactualisation.
- Une structure pérenne de retour d'expérience technique relative aux défaillances et constitution de la base de données
- Optimiser les tâches de maintenance
- Gagner les temps des interventions

7.5.5. 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 permet de faire la gestion de la maintenance à moyen et long terme au niveau des organisations industrielles.

Comme le décrit, les performances d'un programme de maintenance défini par le processus MBF peuvent être obtenues après plusieurs années d'application, et entraîner éventuellement des modifications pour la mise en œuvre d'un nouveau programme. Il est important de comparer la différence des gains économiques entre l'ancien programme de maintenance préventive et le nouveau, ajouter l'application du programme de maintenance préventive et étudier la disponibilité et la sûreté du système et d'ajouter l'étude économique des coûts de la maintenant.

Pour éviter d'attendre à nouveau plusieurs années d'application avant d'obtenir ces informations, il nécessaire de faire la mise à jour de retour d'expérience pour comparer l'avancement de la fiabilité des matériels et ainsi les conséquences de la mise en place du nouveau programme et de laisser place à de possibles modifications ultérieures, la figure III.8 montre les étapes de l'évaluation des performances d'un programme de maintenance de type OMF.

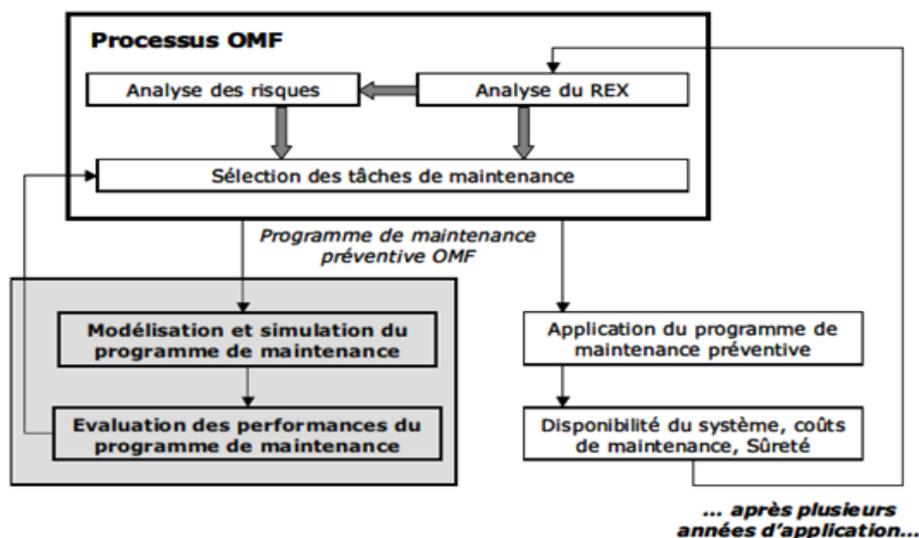


Figure III.8: l'évaluation des performances d'un programme de maintenance de type OMF

8. Choix entre le préventif et le correctif

8.1. Modèle analytique de maintenance

La maintenance fait partie intégrante de tout système de production, joue un rôle important pour garantir la fonctionnalité de l'entreprise et influence de manière significative sa productivité. Une stratégie de maintenance choisie de manière appropriée contribue au fait que les clients reçoivent leurs produits dans les délais et la qualité requis, ce qui contribue à maintenir la compétitivité de l'entreprise. Il est donc évident que le niveau de gestion de la maintenance peut influencer de manière significative le succès de l'entreprise. C'est pour cette raison que le choix de la stratégie du système de maintenance dans la société industrielle permet d'améliorer l'efficacité économique du système de maintenance. Pour remplir cette tâche, les objectifs suivants ont été identifiés :

1. Proposition de méthodologie pour la sélection de la stratégie de maintenance appropriée.

2. Conception du modèle d'aide à la décision pour la sélection de la maintenance appropriée (modèle analytique de maintenance).

3. Caractéristiques des liens entre le modèle et d'autres systèmes d'information et

Sources.

- 4.Évaluation de l'efficacité de la maintenance.

La figure III.9 montre le modèle de la gestion de la maintenance et leurs interactions

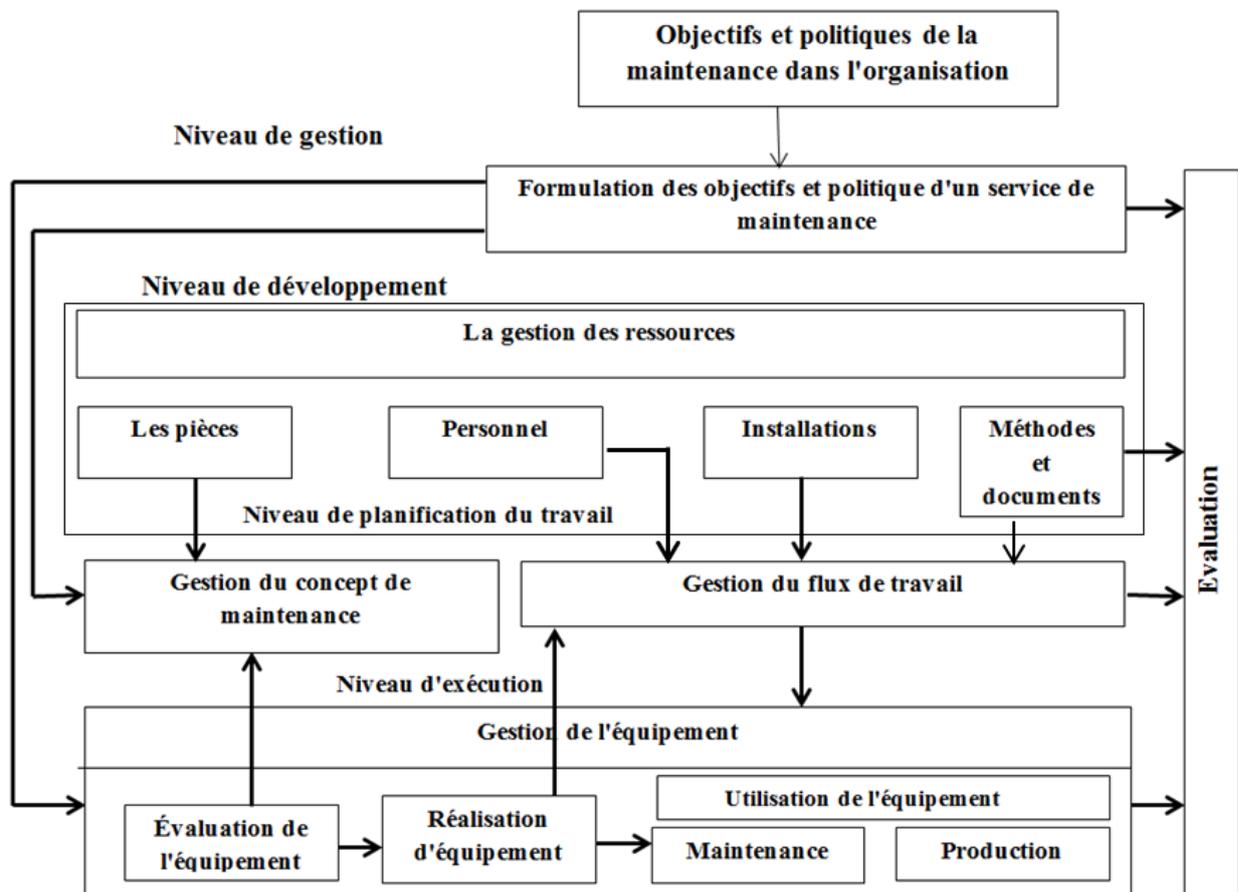


Figure III.9: Modèle de gestion de la maintenance.

8.2. Méthodologie de sélection de la stratégie de maintenance approprié :

Cette partie du document présente une brève description de la méthodologie de sélection de la stratégie de maintenance appropriée pour un système de machines défini. La méthodologie est principalement axée sur les avantages économiques des stratégies mises en œuvre et repose principalement sur l'approche de la gestion axée sur la fiabilité.

L'objectif principal de la méthodologie est de préparer et de fournir les informations nécessaires à la sélection de la stratégie de maintenance pour chaque élément du système (machine), qui utilise efficacement les ressources allouées à la maintenance et présente des avantages optimaux pour l'ensemble du système. La figure III.9 présente les étapes méthodologique de sélection de la stratégie de maintenance appropriée.

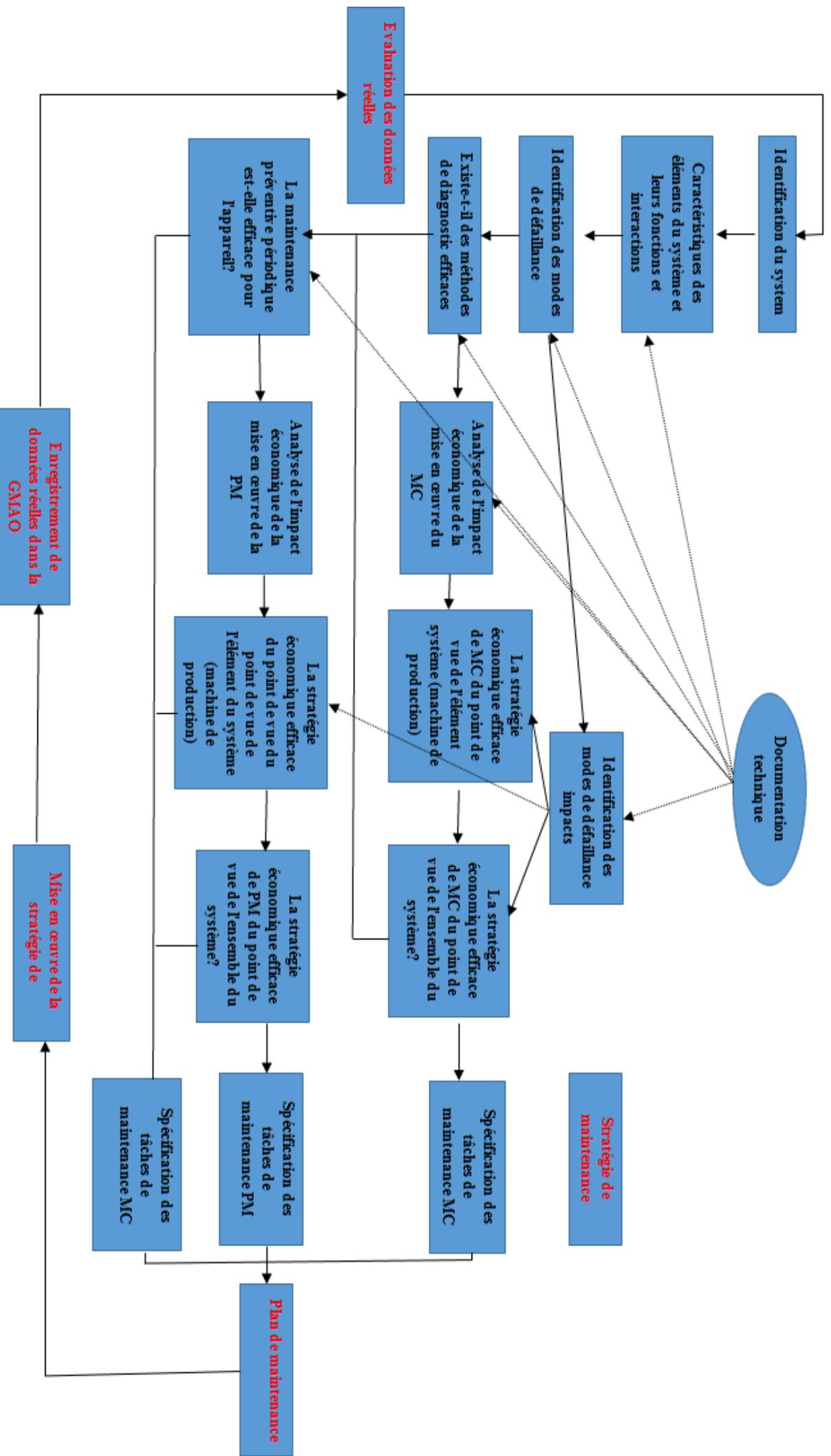


Figure III.10: Module d'analyse de la maintenance Carte de processus de la méthodologie de sélection de la stratégie de maintenance appropriée

9. Conclusion :

Il est important de souligner que les modèles analytique proposées pour améliorer la maintenance basée sur la fiabilité sont différent aux anciens, ces modèles analytique donnent beaucoup d'intérêt à la fonction maintenance, d'un côté, de gestionnaire par l'étude des étapes et des ordres d'application des taches de maintenance, par la suite, on peut comparer et améliorer les plans des interventions selon les critères présentes dans les sites de production et , d'un autre côté, c'est d'optimiser les indicateurs de performance de la maintenance et faire une analyse économique des interventions qui va entraîner éventuellement des modifications pour la mise en œuvre d'un nouveau programme de la maintenance et étudier la disponibilité, la sureté du système.

Ces modèles analytiques reflètent l'aspect polyvalent de la gestion de la maintenance et par conséquent faire la bonne gestion de la maintenance à moyen et long terme au sein des organisations industrielles. C'est pourquoi il est nécessaire de pouvoir apporter un outil d'aide à la décision de maintenance permet de faire la gestion de la maintenance au niveau des organisations industrielles.

10. Maintenance Productive Totale (TPM)

La TPM est une philosophie de maintenance industrielle développée au Japon dans les années 1970. Il s'agit d'un système global de maintenance industrielle qui vise l'obtention du rendement maximal des équipements sur tout leur cycle de vie tout en diminuant les coûts. Cette recherche de la performance repose sur la participation de tous les services et de tout le personnel à l'effort commun. L'esprit de la TPM est de tout mettre en œuvre pour éliminer les pertes directement à la source. Des rencontres multidisciplinaires sont organisées pour permettre le partage de l'information et la recherche de solutions communes. réalise l'amélioration progressive et continue de l'efficacité du service de maintenance et transfère l'entretien de premier niveau aux opérateurs. La mise en place d'indicateurs de performance globaux permet de cibler les secteurs critiques où doivent être déployés les efforts puis d'évaluer les résultats obtenus.

- Maintenance : Maintenir en bon état; réparer, nettoyer, graisser et accepter d'y consacrer le temps nécessaire.
- Productive : Assurer la maintenance tout en produisant ou en pénalisant le moins possible la production.
- Totale : Considérer tous les aspects et y associer tout le monde.

10.1. Généralités:

[Nakajima, S et al. (1986) (129)] explique que depuis la fin de la deuxième guerre mondiale les industries japonaises ont importé diverses techniques et méthodes de travail des États-Unis pour les adapter ensuite. Dans le domaine de la maintenance industrielle, toutes les théories ont été importées des États-Unis : la maintenance préventive, puis la maintenance productive, l'ingénierie de la fiabilité... Ces théories de maintenance industrielles, assimilées et adaptées aux entreprises japonaises, ont ensuite donné naissance à la TPM ou maintenance participative de l'ensemble de l'entreprise.

La philosophie du concept TPM c'est la recherche de la productivité maximale du système industriel, de l'utilisation maximale du potentiel productif. C'est à ce titre que l'on parle de la recherche des zéro pannes. La démarche TPM est une démarche qui s'articule autour de deux phases. La première est une phase d'analyse qui a principalement pour but d'améliorer le rendement global de l'appareil de production, la deuxième phase est une phase

d'amélioration autour du concept d'auto-maintenance (c'est à dire de la participation du personnel de production par sa responsabilisation dans le fonctionnement de son équipement).

La TPM a pour objectif :

- La réalisation du rendement global maximum de l'équipement,
- Recherche à établir un système global de maintenance productive pour toute la durée de vie des installations,
- Implique la participation de toutes les divisions, notamment celles de la conception, de l'exploitation et de la maintenance, et ceci, à tous les niveaux hiérarchiques, des dirigeants aux opérateurs,
- Utilise comme moyen de motivation les activités autonomes du personnel regroupé en "cercles"
- Optimiser les couts d'exploitation des équipements durant toute leur durée de vie (Life Cycle Cost).
- Améliorer le savoir-faire de chacun pour créer un processus d'amélioration permanente des performances de l'entreprise.

L'entreprise procédera, grâce à l'application de la maintenance productive avec la participation de tout le personnel, à l'accroissement du rendement global des installations, à l'amélioration de la qualité et de la sécurité, à la réduction du coût de fabrication et, par ces activités, à l'amélioration de l'état d'esprit de tout le personnel.

Les entreprises diffèrent selon leur secteur d'activité ainsi que selon leur culture et leur vécu. Les modes de production, l'état des installations, les besoins et les problèmes auxquelles elles sont confrontées, le niveau technique de fabrication et de gestion sont propres à chacune. La procédure et les points d'appui dans l'application de la TPM doivent donc être adaptés à chaque milieu.

10.2. Les démarches de la TPM :

10.2.1. La Phase d'analyse

Dans cette phase d'analyse, on va comparer le fonctionnement réel du système de production par rapport à une situation de référence dans laquelle il fonctionne de manière optimale (on entend par optimale : sans aléas, sans pertes d'efficacité). Cette comparaison

amène à relever les 16 causes principales de pertes d'efficacité maximale. Elles sont dues soit aux hommes, soit aux équipements, soit aux matières, soit à l'énergie.

Il existe trois grandes familles de pertes :

- Les pertes dues au manque de fiabilité des équipements.
- Les pertes dues aux carences de l'organisation.
- Les pertes dues aux méthodes et procédés utilisés.

1) Les pertes dues au manque de fiabilité des équipements

- Pannes
- Réglages
- Pertes au démarrage
- Micro-arrêt
- Marche à vide
- Sous-vitesse
- Rebuts et retouches
- Arrêts programmés

2) Les pertes dues aux carences de l'organisation

- Temps de changement de fabrication
- Activité opérateurs
- Déplacements et manutentions
- Organisations du post
- Défauts de logistique
- Excès de mesures

3) Les pertes dues aux méthodes et procédés

- Rendement des matériaux
- Rendement énergétique
- Surconsommation d'outillage, d'accessoires et de lubrifiants

8.2.2. La phase d'amélioration

Comme nous l'avons signalé auparavant, l'objectif de la méthode TPM c'est d'atteindre les zéro pertes.

Pour arriver à cet objectif, la méthode TPM s'est structurée en 5 principes qui se traduiront en 8 piliers. La philosophie globale de cette démarche de management étant la recherche de la performance économique de l'entreprise.

9.2.2.1. Les 5 principes

1^{er} Principe : Atteindre l'efficacité maximale des équipements.

Pour cela il est indispensable de :

- Respecter les conditions de base d'utilisation des équipements : supprimer toutes les causes de pertes chroniques et de dégradations forcées. Ceci concerne principalement les hommes de production (plus les opérateurs seront proches de l'équipement et plus ils seront à même de détecter au plus tôt les prémices d'anomalies sur celui-ci).

On voit ici que la TPM aura pour objectif de rendre responsables les opérateurs de la qualité et de leur équipement (de son fonctionnement et de sa maintenance).

=> Cette action sera réalisée à l'aide du 1er pilier de la TPM : La gestion autonome des équipements.

- Prévenir les défaillances naturelles : respecter les conditions de base pour prévenir les défaillances naturelles dues à l'usure et détecter/rechercher les améliorations possibles concernant la maintenabilité et la fiabilité.

=> Cette action sera réalisée à l'aide du 3ème pilier de la TPM : La maintenance planifiée.

- Supprimer les causes de pertes de rendement dues à l'organisation : C'est celle qui apportera les gains financiers.

=> La suppression des pertes fera l'objet du 2ème pilier : L'amélioration au cas par cas.

- Améliorer les connaissances et le savoir-faire des opérateurs et des techniciens de maintenances : c'est pérenniser ce que l'on a fait précédemment pour assurer l'efficacité maximale à long terme.

=>D'où le 4^{ème} pilier : Amélioration du savoir-faire et des connaissances.

2^{ème} Principe : Démarrer le plus rapidement possible les nouveaux produits et les nouveaux équipements.

La maîtrise des organes de production permet de rendre plus efficace le travail des responsables de production et de maintenance et de travailler plus efficacement avec les services développement et ingénierie pour la conception et le développement de nouveaux outils plus facile à utiliser et à entretenir.

=>Ceci se traduira au niveau du 7^{ème} pilier : Maîtrise de la conception.

3^{ème} Principe : Obtenir l'efficacité maximale des services fonctionnels.

Les services techniques et administratifs doivent améliorer la compétitivité de la production en diminuant et simplifiant des tâches administratives ainsi que les procédures.

=>D'où le 8^{ème} pilier : application de la TPM dans les bureaux.

4^{ème} Principe : Stabiliser les 5M à un haut niveau.

C'est à dire obtenir le Zéro panne, Zéro défaut, le TRG maximum, maintenir à un haut niveau les 5M (Matière, Machine, Milieu, MO, Méthodes).

=>Ceci se résume dans le 6^{ème} pilier : la maîtrise de la qualité.

5^{ème} Principe : Maîtriser la sécurité, les conditions de travail et le respect de l'environnement. La performance des ressources de production, c'est également l'utilisation de certification environnementale comme la norme ISO 14001, la sécurité, les conditions de travail (moins pénible, moins salissant, moins dangereux).

=>Ce sera l'objet du 5^{ème} pilier : Sécurité - Conditions de travail et environnement.

10.2.2.2. Les piliers de la TPM :

Comme parait dans cette dernière partie, les 5 principes s'expliquent dans 8 piliers sur lesquels s'appuie la démarche TPM. On peut toutefois séparer ces 8 piliers en 2 fonctions distinctes :

Améliorer l'efficacité du système de production :

- 1er pilier : gestion autonome des équipements
- 2ème pilier : amélioration au cas par cas
- 3ème pilier : maintenance planifiée
- 4ème pilier : amélioration du savoir-faire

Obtenir les conditions idéales :

- 5ème pilier : sécurité, condition de travail et environnement
- 6ème pilier : maîtrise de la qualité
- 7ème pilier : maîtrise de la conception
- 8ème pilier : TPM dans les bureaux.

10.3. Le calcul du Taux de Rendement Global : TRG ou le Taux de Rendement Synthétique TRS)

10.3.1. Définition.

Selon R.C. HANSEN et al. (2001) [130] ; C.J. BAMBER et al. (2003) ; [131] ; le suivi du taux de rendement synthétique (TRS) permet de vérifier l'efficacité du plan de maintenance préventive. Il s'agit d'un indicateur destiné à suivre le taux d'utilisation de machines. Il mesure la performance d'un moyen de production, il permet d'identifier les pertes et représente un excellent outil d'investigation.

Le TRS est un ratio décomposé constitué de trois taux intermédiaires. Le TRS met donc en évidence les pertes de production en trois catégories sur lesquelles un plan d'action est mis en place. Figure III.11 illustre les différents ratios

$$\text{TRG} = \text{Taux de disponibilité} * \text{Taux de performance} * \text{Taux de qualité}$$

D'où l'étude et l'analyse des ratios suivants :

Taux de disponibilité = Temps brut de fonctionnement / temps d'ouverture

Taux de performance = Temps net de fonctionnement / temps brut de fonctionnement

Taux de qualité = Temps utile de fonctionnement / temps net de fonctionnement

TRS = Taux de disponibilité * Taux de performance * Taux de qualité

TRS = Temps utile de fonctionnement / temps d'ouverture

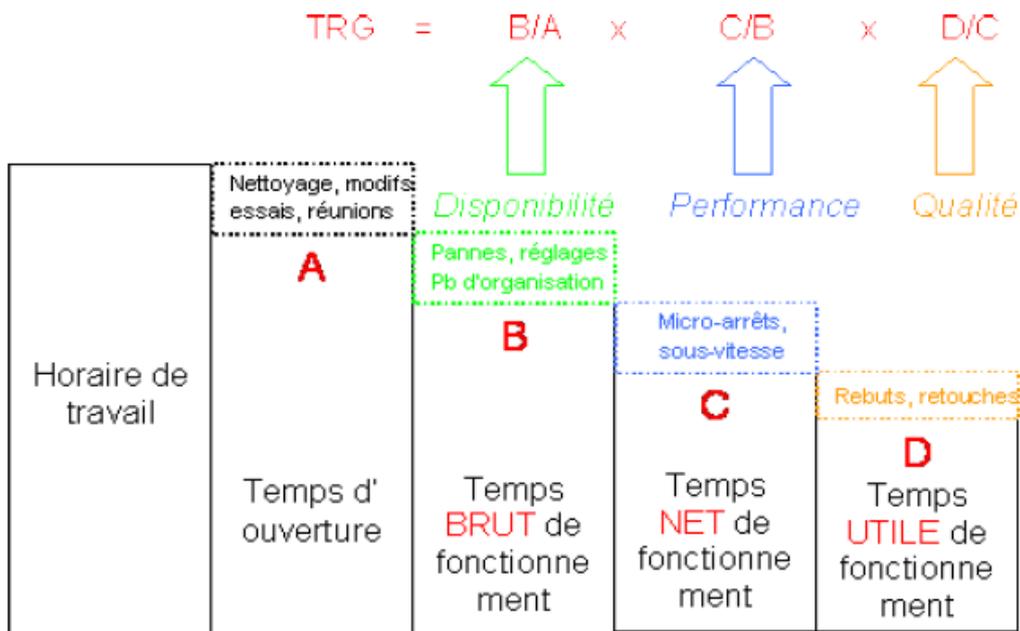


Figure III.11 : la définition des différents pourcentages ou rapports

10.4. L'implantation de la TPM :

Au Japon « L'Institute of Plant Management », propose l'introduction de la TPM en 12 Étapes [133] :

1. Prise de décision par la direction générale d'appliquer la TPM.
2. Campagne d'information technique :

Cette deuxième étape a pour objectif de faire acquérir au personnel une connaissance commune et précise de la nature générale de TPM, les enjeux et les objectifs, le déroulement général d'un programme type TPM, un langage commun.

3. Mise en place d'une structure de promotion de la TPM.

4. Diagnostic général sur les équipements :

Egalement appelé nettoyage initial, cette étape consiste en fait en un constat minutieux de l'état de dégradation de tous les organes de la machine, état de dégradation se manifestant par des usures, des fuites, des salissures, ...etc. Il s'agit donc plus d'une inspection de la machine, au-delà du plaisir de la propreté.

5. Etablissement d'un plan de travail général (à moyen terme). La nature des différents travaux techniques et organisationnels découlant de l'implantation de TPM, les ressources nécessaires et la durée obligatoire interdisent l'improvisation et impliquent l'élaboration d'un programme directeur préalable.

6. Lancement des opérations prévues.

7. Amélioration de la disponibilité de chaque machine retenue :

Cette étape se réalise sur la base de la participation des opérateurs et les techniciens concernés qui organisent en groupe de travail réduits.

8. Développement de la maintenance autonome : Cette étape a pour objectif de mettre en place les conditions de base nécessaires pour que la fabrication soit en mesure d'assurer une partie de la maintenance systématique des équipements qu'elle a conduit.

9. Optimisation économique du nouveau service maintenance :

La maintenance programmée a pour objectif de définir et d'appliquer les contenus techniques de maintenance non couverte par les contenus de la maintenance autonome, et d'assurer le maintien de l'état des équipements et la gestion de leur évolution à moyen terme.

10. Formation complémentaire des opérateurs :

Il s'agit ici de consolider et de pérenniser les acquis par le perfectionnement des opérateurs de la fabrication et de la maintenance et des niveaux d'encadrement direct aux pratiques de la maintenance et à la connaissance des équipements. La formation est l'outil privilégié.

11. Adaptation du système de gestion de la conception des équipements :

C'est à ce stade, qu'il sera possible de passer aux modifications de conception des équipements existants en vue d'améliorer, soit les paramètres conditions du processus, soit la maintenabilité ou fiabilité.

12. Quelles que soient la nature et la qualité des structures en place à la fin du programme initial, il sera capables de fédérer et de focaliser les différentes contributions vis-à-vis d'un objectif commun.

La démarche TPM peut s'appliquer dans les entreprises de production de toutes tailles et de tous secteurs d'activités, à partir du moment où elles possèdent un outil de fabrication nécessitant des actions de maintenance.

La démarche TPM a pour objectif la rentabilité maximale des équipements ; elle cherchera donc à diminuer les pertes de rendement de l'outil de production. Et l'amélioration de la disponibilité des matériels par une analyse détaillée de leurs temps productifs et de leurs temps non productifs.

11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé les différentes étapes permettant de suivre et améliorer la méthode de la maintenance basée sur la fiabilité (MBF) qui nous permet de choisir et optimiser la maintenance préventive, en se basant sur les modèles analytiques proposés d'optimisation et l'évaluation de l'indisponibilité des équipements de production de maintenance par l'intermédiaire des indicateurs de performance de maintenance, les critères de choix entre la maintenance préventive et corrective, le suivi de l'implantation de la TPM (Total Productive Maintenance).

La définition de ses indicateurs de performances qui sont généralement regroupés dans un tableau de bord qui permet de traiter et de mettre en forme un ensemble d'informations, de façon à caractériser l'état et l'évolution d'une situation donnée, l'utilisation de tableaux de bord permet de conduire vers une disponibilité maîtrisée des équipements, et vers une réduction des coûts par la connaissance des événements et des activités du service.

CHAPITRE IV

Etudes de cas effectuées

1. Introduction du chapitre :

Le marché économique mondial connaît actuellement une grande mutation marquée essentiellement par la crise financière et le recul du pouvoir d'achat. Face à ce nouveau contexte économique, les dirigeants d'entreprises se doivent adapter leurs stratégies de planification de la fonction production et de la fonction maintenance pour assurer leur croissance.

Dans ce chapitre, nous abordons des études de cas afin de montrer l'intérêt de ce travail dans l'industrie et d'avoir des applications réelles afin d'exécuter et d'évaluer les techniques de la maintenance qu'on a vu dans le 3eme chapitre dans les sites industriels et d'implanter les étapes nécessaires à la mise en place d'un plan de maintenance pour atteindre une stratégie de maintenance optimale pour l'entreprise, nous discutons quels indicateurs sont nécessaires pour le suivi et l'optimisation du plan de maintenance.

Etude de cas N°1 : au sein d'une société d'exploitation minière

2. Introduction.

Les arrêts de la production dû à des défaillances imprévues des installations, sont devenus une perte trop onéreuse pour l'entreprise, suite à leurs conséquences : la non satisfaction des clients dans les délais prévus, d'où le risque de perdre des marchés et la détérioration de la qualité des produits, etc.

D'où l'entreprise a vu la nécessité d'adopter une stratégie de maintenance ayant pour objectif le maintien du matériel dans un état assurant la production voulue au coût optimal. C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude visant l'amélioration de la disponibilité des outils de production de l'entreprise en effectuant des analyses basées sur les données et les statistiques générées.

Après avoir pris connaissance des moyens de production et le service de maintenance, on a effectué une analyse des archives et l'historique des interventions de maintenance réalisées. Après, on a apporté notre modeste contribution au niveau de la gestion des interventions.

Ce chapitre est le fruit d'un stage dans le service maintenance des engins du fond au sein d'une société d'exploitation minière.

L'entreprise est à sa 6ème année de phase d'implantation d'un système de gestion de la maintenance. Un grand travail a déjà été fait après l'implantation, c'est-à-dire la structuration de la société et la codification des équipements, il nous reste à faire la mise à niveau de l'historique des interventions et les exploiter au maximum afin d'améliorer les disponibilités d'équipement de production des possibilités de ce système.

Pour faire l'étude complète il faut tout d'abord définir les engins et leur principe de fonctionnement pour une étude soit fiable et facile. Les engins qu'on va étudier sont les TORO et les JUMBO.

3. Présentation des engins de fond

3.1. Présentation du TORO



Figure IV.1 : Image du TORO

1. Cadre avant
2. Cadre arrière
3. Ensemble moteur
4. Transmission

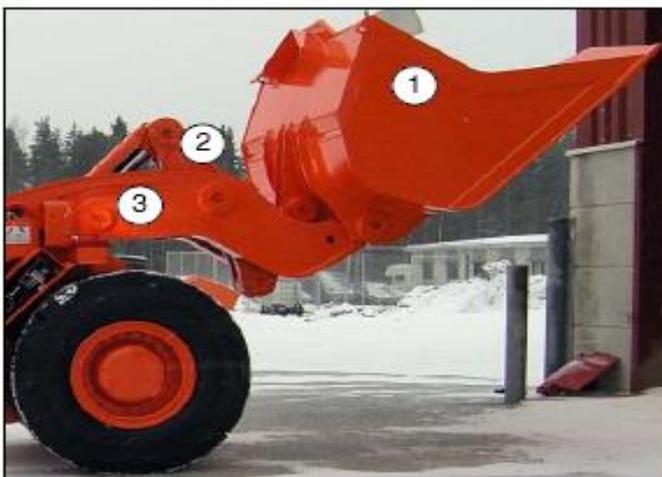


Figure IV.2 : cadre avant du TORO

1. Godet
2. Levier de pivotement
3. Flèche

Le chargeur minier souterrain TORO est un engin destiné au chargement, au transport en galeries et au culbutage des matériaux rocheux à l'exclusion de toute autre utilisation.

La longueur total du TORO (avec le godet) est 8470 mm (sans godet : 2050 mm), sa hauteur avec le toit est 2150 mm, sont poids est 14500 kg, et peut transporter une charge de 6200kg avec une vitesse de roulement qui atteint 25.0 km/h

3.1.1. Moteur :

Le TORO dispose d'un moteur diesel Deutz F6L 413FW (ou F8L), d'une puissance de 102 kw (139 hp) / 2300 tr/min, le couple fournit est de 487 Nm/1500 tr/min, ce moteur contient 6 cylindre, avec un volume de 9572 cm³ et la combustion se fait en 4 temps.



Figure IV.3 : les éléments du moteur de TORO

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1. Alternateur | 9. Refroidisseur d'huile |
| 2. Filtres à huile moteur | 10. Collecteur d'échappement |
| 3. Remplissage d'huile moteur | 11. Collecteur d'admission |
| 4. Jauge | 12. Pot catalytique/silencieux |
| 5. Filtres à huile / pompe à main | 13. Support du moteur |
| 6. Filtre à air | 14. Soupapes de réservoir de Carburant |
| 7. Soupape d'évacuation poussière | 15. Interrupteur général |
| 8. Courroie de transmission | |

3.1.2. Transmission

Le TORO est équipé d'un convertisseur de couple et d'une boîte de vitesses commandée en charge hydrauliquement.

Le convertisseur sur moteur commande la boîte à vitesse commandée en charge par l'arbre de transmission. Les rapports de vitesse sont sélectionnés par le sélecteur de vitesse électrique (levier situé dans la cabine). Les vitesses peuvent être utilisées pour la marche avant ou la marche arrière. La puissance est dirigée depuis la transmission par des arbres de transmission vers les différentiels des essieux avant et arrière. Les différentiels d'essieux avant commandent les moyeux de roue planétaire.

L'huile sous pression est dirigée depuis la soupape de commande jusqu'aux embrayages de la vitesse et du sens de marche sélectionnés.

L'embrayage de sens de marche ou de vitesse consiste en un tambour avec cannelures internes et alésage destiné à recevoir un piston actionné hydrauliquement. Un disque en acier à denture externe est inséré dans le tambour, reposant contre le piston. Ensuite est inséré un disque de friction avec cannelures sur le diamètre interne. Les disques sont alternés jusqu'à obtention du total requis.

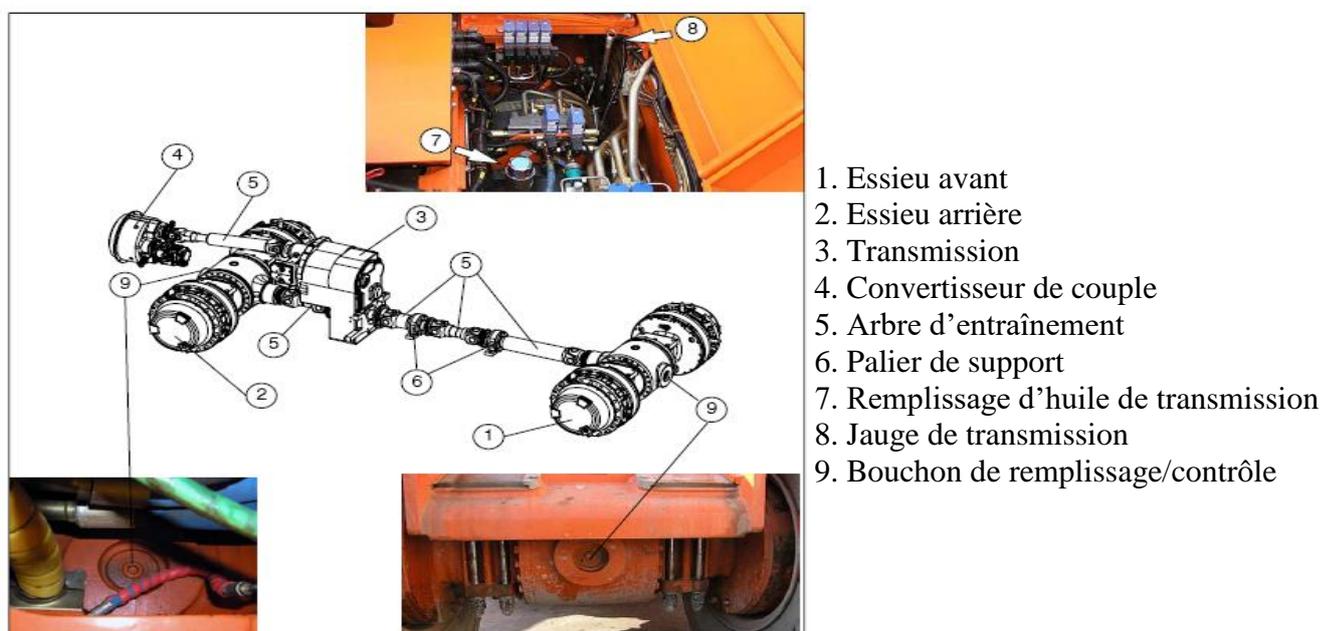


Figure IV.4 : partie de transmission

3.1.3. Direction

Le TORO comprend une servo- direction à articulation centrale avec deux cylindres de direction à double effet .la pompe montée sur le convertisseur amène l'huile à la soupape principale de direction celle-ci est commandée par les soupapes de commande de direction

La pression d'asservissement est dirigée depuis la soupape de commande vers la soupape de direction principale. Lorsque l'on tourne le levier de commande, la pièce d'espacement de la soupape de commande principale de direction se déplace et le flux d'huile provenant de la pompe est dirigé vers les cylindres de direction qui tournent la machine. Quand le levier de direction est maintenu fixe, la soupape de commande se ferme et l'huile s'écoule jusqu'à l'extrémité du cylindre ce qui fait rester la machine dans l'angle déterminé de direction.

Le rôle de la soupape d'arrêt de direction est d'éviter les accidents. La direction ne fonctionne pas si la porte de cabinet est ouverte.

Le surplus de flux de la pompe de direction est dirigé vers le circuit hydraulique du godet en passant par la soupape principale de direction ou, si la direction n'a pas utilisé, tout le débit de la pompe. Le débit de la pompe dépend du nombre de tour du moteur. L'huile revenant des cylindres s'écoule par la soupape principale de direction et le filtre d'huile de retour pour revenir au réservoir d'huile hydraulique.

La soupape de sûreté de circuit de direction est réglée à 210 bar et les soupapes pour charge par à-coups s'ouvrent à 125 bar

3.1.4. Système hydraulique du godet de pelle :

La partie intérieure de la double pompe amène l'huile à la soupape principale du godet Le débit en surplus de circuit hydraulique de direction (quand la direction n'est pas utilisée) s'écoule vers la soupape principale de godet depuis la soupape principale de direction.

Lors du déplacement de la soupape de servocommande de godet, la pression de guidage (25 bars) passe de la soupape de commande à la soupape principale et déplace les pièces d'espacement de soupapes principales. L'huile sous haute pression s'écoule par la soupape principale vers les cylindres de levage ou de basculement ce qui fait bouger le godet.

La pression d'huile du circuit du godet est réglée à 210 bars avec la soupape de sûreté principale. Les soupapes de charge par à-coups s'ouvrent à 250 bars et 50 bars sur le côté piston du cylindre de basculement.

Les circuits de levage et de basculement sont équipés de soupape à détente brusque pour obtenir une tenue de la charge en cas de défaut de tuyaux.

3.1.5. Le système de freinage

L'huile de la pompe montée sur le convertisseur (pompe de servo-système) s'écoule vers la soupape de charge de l'accumulateur quand la pression du circuit est régulée sur une plage de service correcte (123...150 bars)

Lorsque l'on appuis sur la pédale, l'huile passe des accumulateurs par la soupape de la pédale et les clapets antiretour doubles aux freins de roue. Les essieux avant et arrière ont des circuits séparés. Quand la pédale est relâchée, l'huile des freins de roue revient par la soupape de la pédale au réservoir.

Les freins de secours et de stationnement sont commandés par les leviers situés dans la cabine.

En poussant le levier, l'opérateur actionne le frein correspondant et en le tirant il desserre le frein.

Le frein de stationnement est actionné automatiquement si le moteur ne tourne pas ou si le courant électrique est coupé. La position du levier du frein de stationnement n'a pas d'effet sur cette fonction automatique. Quand le frein a été actionné automatiquement, il peut être desserré en poussant sur le bouton de frein de stationnement sur le tableau de bord dès que la pression dans le circuit est supérieure à 95 bars.

3.2. Présentation du JUMBO

L'équipement de forage est conçu exclusivement pour le forage de trous dans des tunnels et des mines, Cette opération se base sur la transformation de l'énergie hydraulique développée en énergie mécanique de destruction de la roche.

Cette transformation permet de développer trois types de mouvements : la percussion, la rotation et la poussée.

- ✓ **La rotation** : se positionne « avec un léger décalage » après chaque impact les boutons des taillants en contact avec la roche saine en place
- ✓ **La percussion** : elle crée l'onde de choc qui sert pour la destruction de la roche.
- ✓ **La poussée** : permet l'avancée du train de tige et la progression dans la foration.

3.2.1. Caractéristiques techniques

Longueur, position de transport 9.7-10.4 m

Largeur 2.22 m

Hauteur, engin de forage avec protège-conducteur

1.98-2.60 m

Poids 24-30 tonnes

Puissance installée du moteur diesel 42 kW

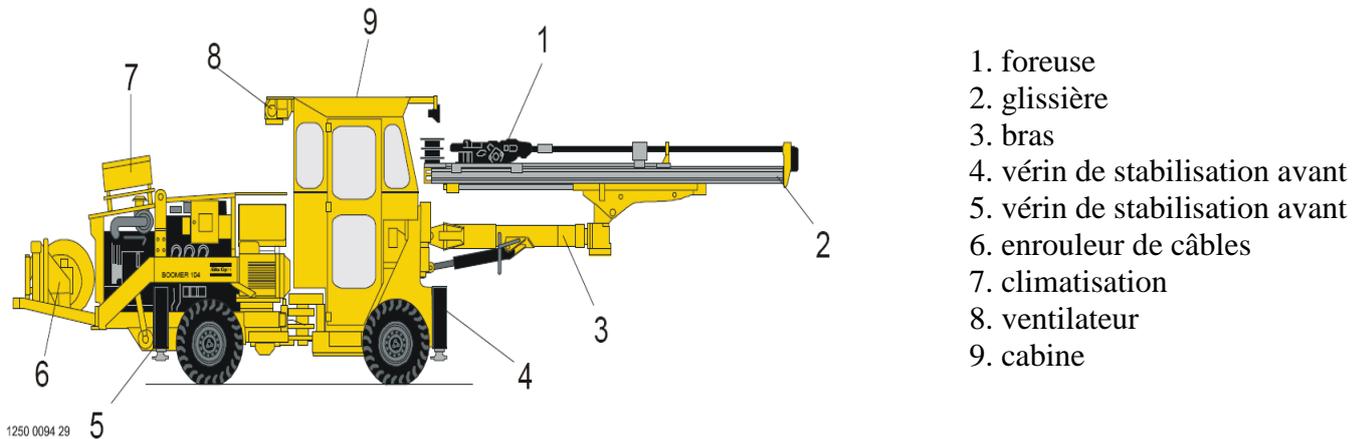


Figure IV.5 : Image du JUMBO

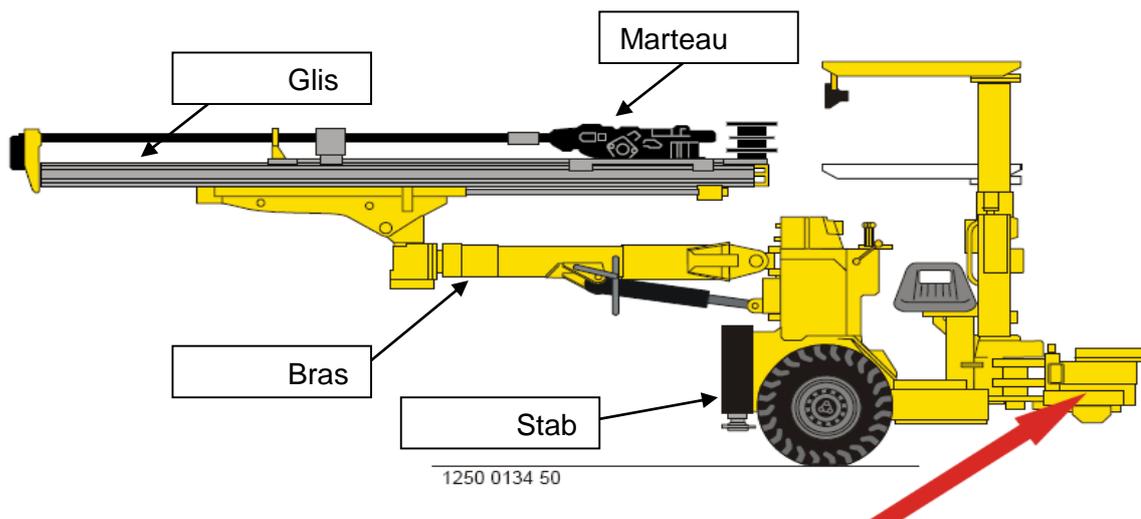


Figure IV.6 : Section avant du JUMBO

3.2.2. Marteau

Le marteau représente la partie la plus importante d'un jumbo, assure deux fonctions principales de foration (rotation et percussion).

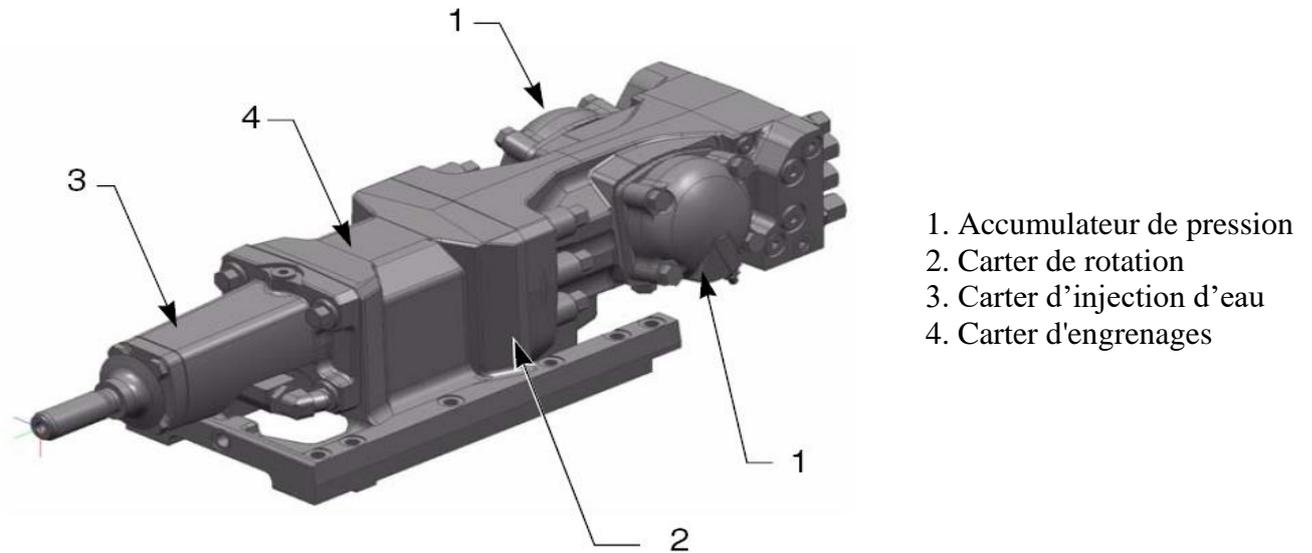


Figure IV.7 : le marteau du JUMBO

3.2.3. Glissière

La glissière constitue le support du marteau et du train de tige, et permet leur translation au cours de foration à l'aide du vérin de poussée et par l'intermédiaire des câbles d'attraction.

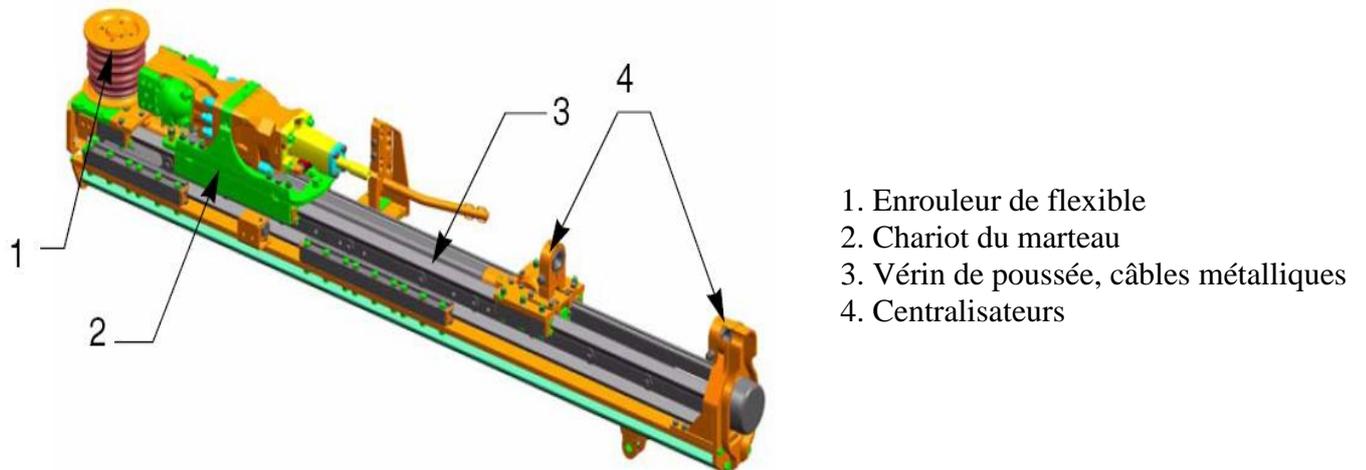


Figure IV.8 : la glissière du JUMBO

1-3- Le bras du marteau

Le bras assure le positionnement pour la foration, le marteau assure la rotation et la percussion et le train de tige assure la transmission de l'énergie pour assurer la foration

Un bras est constitué de vérins, d'une glissière, d'un marteau et d'un train de tige.

3.2.4. Les vérins

Au niveau de chaque bras, plusieurs vérins sont présents et assurent chacun une fonction :

- Deux vérins de levage du bras ;
- Un vérin d'extension du bras ;
- Deux vérins de parallélisme des bras ;
- Un vérin de rotation de la glissière ;
- Un vérin de basculement de la glissière ;
- Un vérin d'extension de la glissière ;
- Un vérin de translation du marteau.

3.2.5. Boom

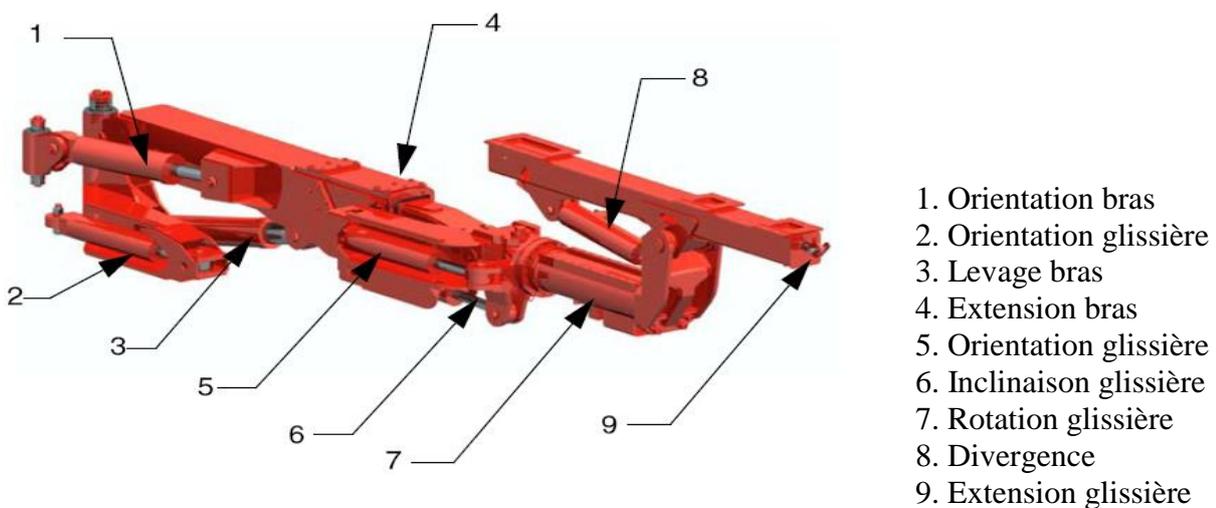


Figure IV.9 : le bras du JUMBO

3.2.6. Positionnement Bras

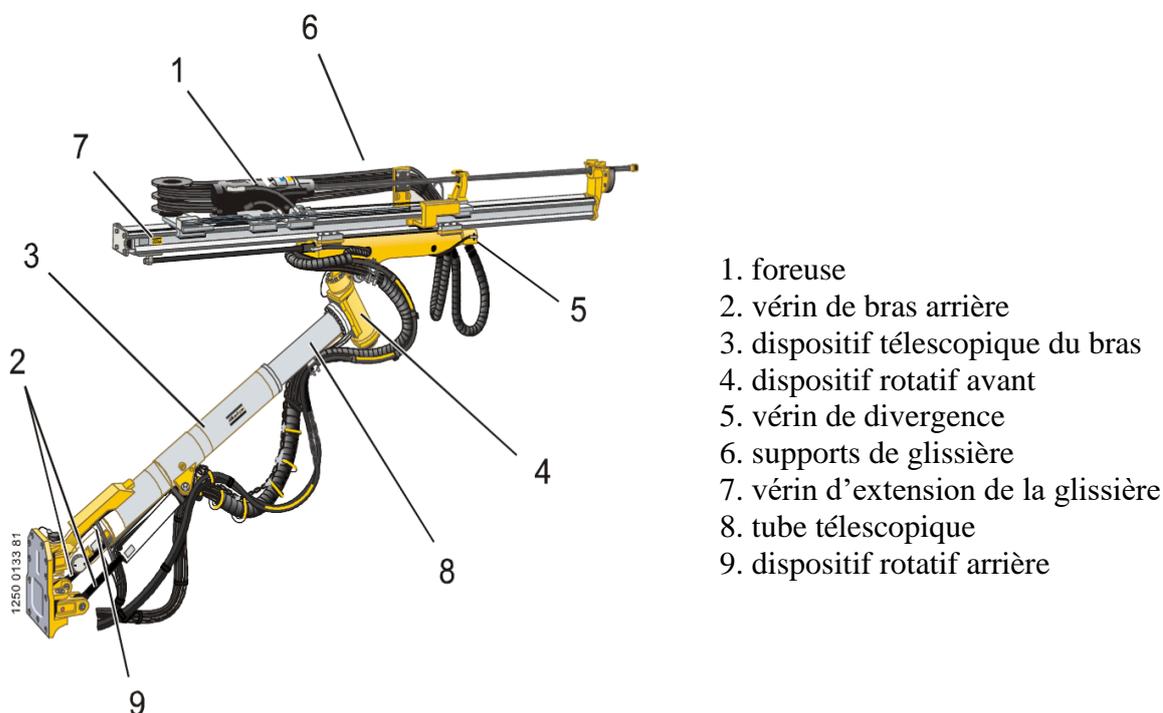


Figure IV.10 : bras et glissière

4. Analyse Pareto des équipements :

L'analyse de Pareto consiste à déterminer la minorité des causes responsables de la majorité des effets. On peut alors faire un plan d'action sélectif qui s'attaque aux éléments essentiels. On optimise ainsi l'action on ne s'intéressant pas aux nombreux éléments qui ne sont responsables que d'une très petite minorité d'effets à éliminer. On peut, grâce à elle, déterminer, par exemple :

- La minorité des équipements responsables de la majorité des coûts de maintenance.
- La minorité des équipements responsables de la majorité des temps d'arrêts de production.
- La minorité des équipements responsables de la majorité des défaillances et des pannes.

Premièrement on a réalisé une analyse du temps d'arrêt des engins de type TORO, pour déterminer les TORO sur lesquels il faut concentrer les efforts de maintenance et les interventions puis on étudie la totalité des engins TORO pour voir quelles sont les organes les plus défectueuses dont lesquelles il faut faire une analyse d'AMDEC.

4.1. Détermination de l'engin TORO le plus critique

On a calculé la durée d'arrêt de chaque engin dans les six mois à partir de l'historique des pannes des engins.

Engins	Durée d'arrêt
Toro/7	595.5
Toro/3	413.95
Toro/1	362
Toro/11	359.5
Toro/10	343
Toro/2	326.1
Toro/9	292
Toro/8	182.6
Toro/12	180
TORO 4	43.5
TORO 6	22.5

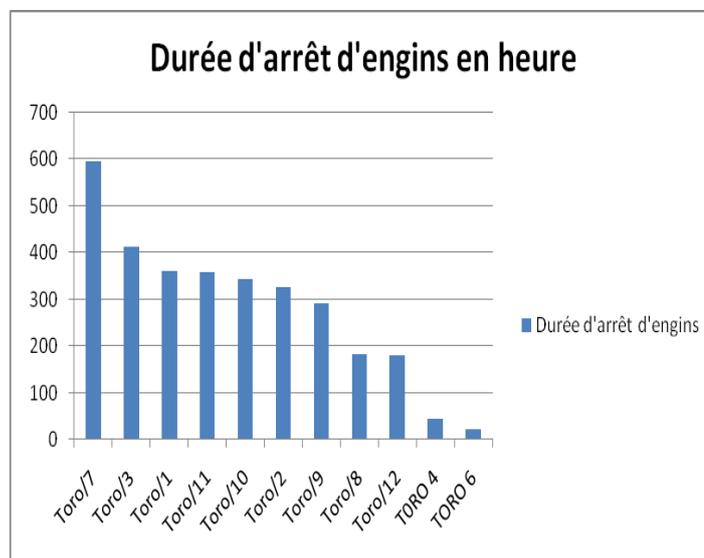


Figure IV.11 : classification des engins selon le temps d'arrêt

Tableau IV.1 : durée d'arrêt d'engin TORO

4.1.1. La méthode Pareto en type d'organe pour le TORO

La méthode stipule qu'on doit calculer le Ration RD pour qu'on puisse faire sortir les classes A, B et C.

Rang	% d'élément	% cumulés	Types	nombre d'arrêt	cumulé de nombre d'arrêt	% cumulés
1	0,076	7,69	flexibles	143	143	22.23%
2	0,076	15,38	vérins	92	235	36.54%
3	0,076	23,08	filtres	84	319	49.61%
4	0,076	30,77	moteur	72	391	60.80%
5	0,076	38,46	pneu	54	445	69.20%
6	0,076	46,15	freins	49	494	76.82%
7	0,076	53,85	pompes	37	531	82.58%
8	0,076	61,54	accumulateurs	29	560	87.09%
9	0,076	69,23	réducteurs	24	584	90.82%
10	0,076	76,92	godet	19	603	93.77%
11	0,076	84,62	cardan	18	621	96.57%
12	0,076	92,31	graisseurs	13	634	98.60%

13	0,076	100,00	boite à vitesse	9	643	100%
----	-------	--------	-----------------	---	-----	------

Tableau IV.2. Durée d'arrêt des organes de l'engin TORO

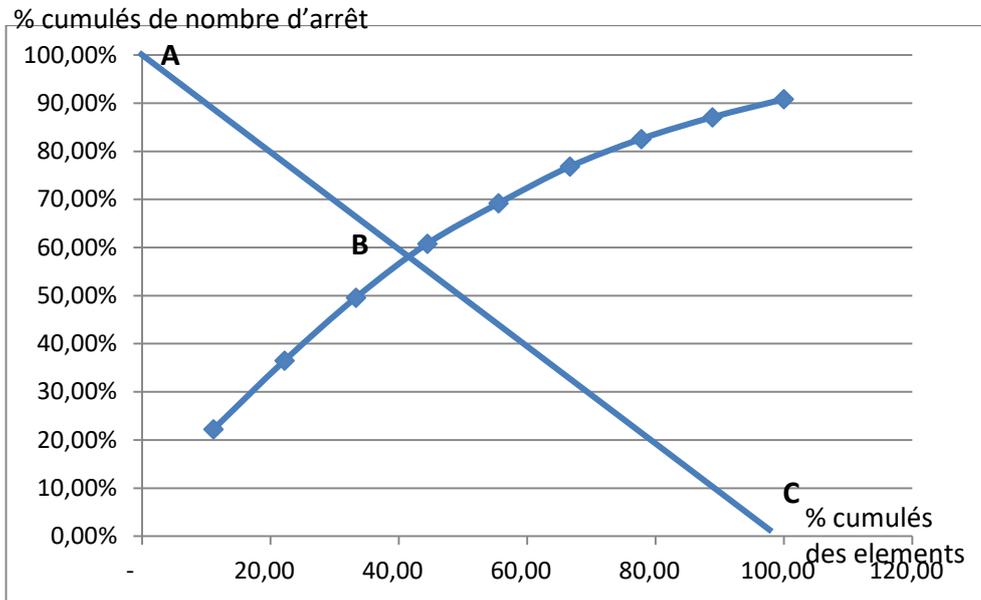
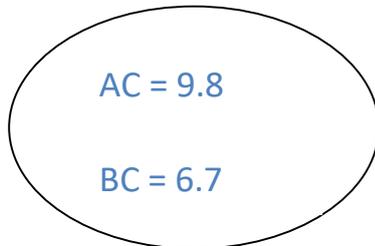


Figure IV.12. Présentation de la courbe ABC pour TORO

4.1.2. Calcul du ratio RD :

$$RD = BC/AC$$



Donc RD = 68.36%

valeur RD	A	B	C
1>RD>0,9	10	10	80
0,9>RD>0,85	10	20	70
0,85>RD>0,75	20	20	60
0,75>RD>0,65	20	30	50
0,65>RD	Non interprétable		

Tableau IV.3. Les valeurs du ratio RD

D'après le tableau qui représente les classes ABC selon la valeur RD, on a trouvé 3 classes

Groupe A = 20 %,	Groupe B = 30 %,	Groupe C = 50 %
flexibles	moteur	accumulateurs
vérins	pneu	réducteurs
filtres	freins	godet
	pompes	cardan
		graisseurs
		boite à vitesse

Tableau IV.4. Définition des groupes

Dans cette étude on va se concentrer sur les éléments de la classe A. Les 20 % des organes qui provoquent la majorité de nombre d'arrêt afin de réaliser des actions correctives et pour le bien de l'entreprise on va ajouter la classe B voir (annexe 1)

4.2. La méthode Pareto en type d'organe pour le JUMBO

On a calculé la durée d'arrêt de chaque engin dans les six mois à partir de l'historique des pannes des engins

Engins	Durée d'arrêt
Jumbo/5	593
Jumbo/8	480.5
Jumbo/11	369
Jumbo/7	352.5
Jumbo/6	303.05
Jumbo/4	290
Jumbo/9	243
Jumbo/10	211.56
Jumbo/12	194
Jumbo 2	153

Tableau IV.5. Durée d'arrêt de l'engin JUMBO

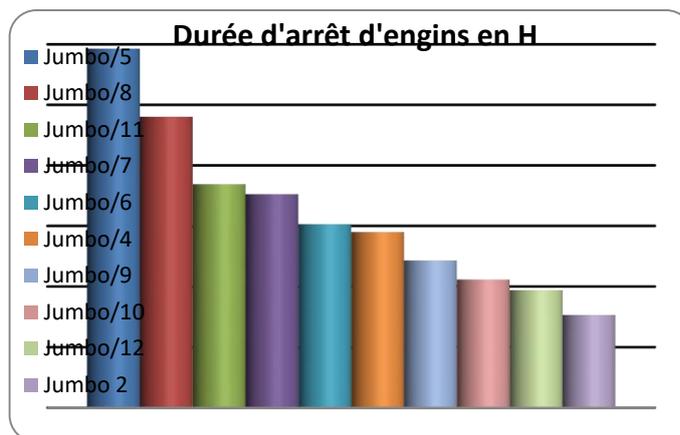


Figure IV.13 : classification des engins selon le temps d'arrêt

Depuis le diagramme ci-contre l'engin le plus critique c'est le JUMBO N° 5 donc il faut faire une étude complète sur cet engin afin de connaître les éléments les plus critiques et l'y remédier, Dans ce cadre on va faire l'analyse ABC pour les organes de toute la famille JUMBO pour déterminer les organes les plus défaillants.

4.2.1. Analyse du Pareto en type nombre d'arrêt d'organe de l'engin JUMBO

Premièrement on a classé les éléments du JUMBO selon la fréquence de répétition des pannes, en suite on a représenté le pourcentage de chaque panne, on les a classés selon l'ordre décroissant.

Les éléments qu'on a traités sont :

Rang	% d'élément	% cumulés	Engins	nombre des pannes pendant les 6 mois	cumule d'arrêt	% cumulés
1	0,111	11,11	les flexibles	564	564	35,21%
2	0,111	22,22	les câbles	252	816	50,94%
3	0,111	33,33	le marteau	186	1002	62,55%
4	0,111	44,44	la glissière	180	1182	73,78%
5	0,111	55,56	la tête d'encrage	126	1308	81,65%
6	0,111	66,67	les raccords et les adaptateurs	114	1422	88,76%
7	0,111	77,78	les poulies	78	1500	93,63%
8	0,111	88,89	les distributeurs	60	1560	97,38%
9	0,111	100,00	la tige d'emmanchement	42	1602	100,00%

Tableau IV.6. Durée d'arrêt des organes de l'engin JUMBO

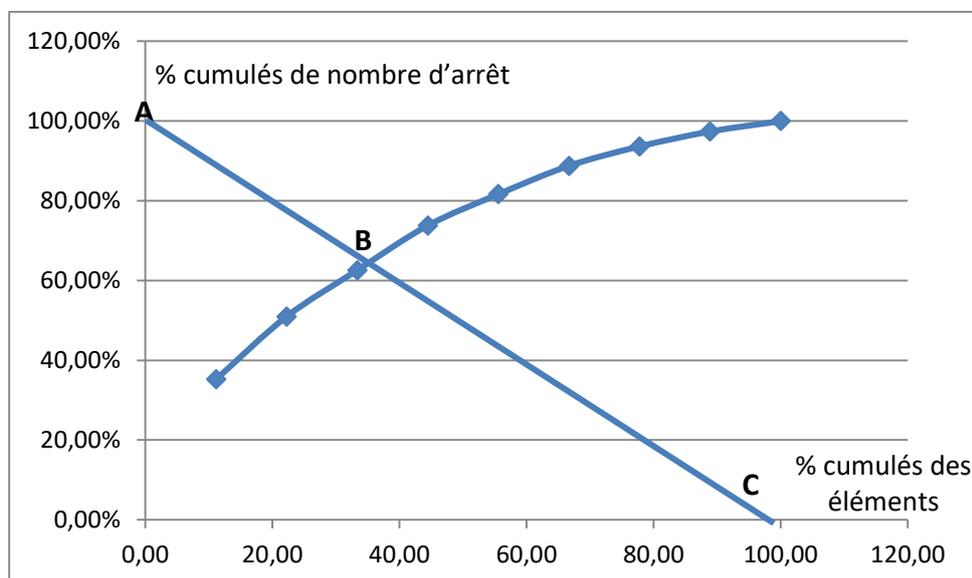
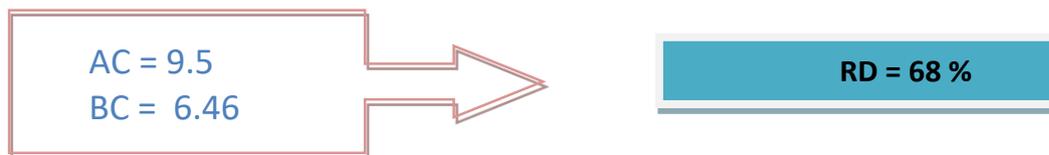


Figure IV.14 : présentation de la courbe ABC pour JUMBO

4.2.2. Calcul du ratio RD :

$$RD = BC/AC$$



valeur RD	A	B	C
1 > RD > 0,9	10	10	80
0,9 > RD > 0,85	10	20	70
0,85 > RD > 0,75	20	20	60
0,75 > RD > 0,65	20	30	50
0,65 > RD	Non interprétable		

Tableau IV.7. Les valeurs de la ration RD

Selon les valeurs du tableau on peut classer les groupes comme le suivant :

<u>Groupe A 20%</u>	<u>Groupe B 30%</u>	<u>Groupe C 50%</u>
les flexibles	le marteau	les raccords et les adapteurs
les câbles	la glissière	les poulies
	la tête d'encrage	les distributeurs
		la tige d'emmanchement

Tableau IV.8. Définition des groupes

Dans cette étude on va se concentrer sur les éléments de classe A afin de réaliser des actions correctives et la même chose pour que l'étude soit efficace on peut ajouter la classe B voir (annexe 1)

5. indicateurs nécessaires au suivi du plan de maintenance préventive.

Il existe de nombreux indicateurs. Ce chapitre présente ceux qui ont été mis en place sur le site de production en parallèle au plan de maintenance préventive. Pour qu'un indicateur soit significatif et exploitable il faut que les valeurs utilisées qui le composent soient mesurables, définies avec précision, et qu'elles aient des bases homogènes. Le choix de l'indicateur dépend de l'utilisation que l'on veut faire des informations, et appartient à chaque responsable. Il doit permettre de contrôler et de vérifier le fonctionnement du processus.

L'utilisation de ces indicateurs doit donc permettre non seulement de fixer des objectifs tant aux niveaux économiques, techniques et humains mais aussi de suivre les résultats, et ainsi en apprécier les écarts et les analyser. Ces indicateurs constitueront donc les outils indispensables pour une gestion efficace de l'outil de production et de la fonction maintenance :

- Amélioration de la productivité.
- Tenue et justification des objectifs.
- Mise en évidence des points faibles.
- Aide à la décision lors de changements de matériels, etc.

La mise en forme de ces indicateurs doit faciliter la réflexion du décideur. Les indicateurs doivent donc être :

- Globalisés pour synthétiser la masse des informations saisies puis sélectionnées.
- Peu nombreux, mais descriptifs de la fonction à piloter.
- Simples, visuels, clairs pour être facilement compréhensibles et interprétables.
- Objectifs pour donner une image incontestable d'une situation.
- Structurés suivant l'objectif à atteindre.
- Sélectionnés : trop d'informations nuisent à l'analyse, mais trop peu ne permettent pas une description complète de la situation.
- Établis sur une période de référence identifiée et significative.

5.1. Taux de rendement synthétique.

5.1.1. Définition.

Le suivi du taux de rendement synthétique (TRS) permet de vérifier l'efficacité du plan de maintenance préventive. Il s'agit d'un indicateur destiné à suivre le taux d'utilisation de machines. Il mesure la performance d'un moyen de production, il permet d'identifier les pertes et représente un excellent outil d'investigation. Pratiquement, le TRS correspond au rapport entre le nombre de pièces produites de bonne qualité pendant une certaine période, et le nombre de pièces qui auraient théoriquement pu être produites durant la même période.

Le TRS décomposé est un ratio constitué de trois taux intermédiaires. Le TRS met donc en évidence les pertes de production en trois catégories sur lesquelles un plan d'action est mis en place. Les trois taux intermédiaires qui composent le calcul théorique du TRS sont :

- Taux de Performance (TP)= le temps net de fonctionnement/ le temps brut de fonctionnement
- Disponibilité Opérationnelle(DO)= le Temps de bon fonctionnement / le temps Requis

➤ Taux de qualité (TQ) = le temps utile de fonctionnement/ le Temps net de fonctionnement

TRS = taux de disponibilité * taux de performance * taux de qualité

Avec :

- **Le temps brut de fonctionnement** = le temps d'ouverture – le temps d'arrêt total

On peut le calculer le temps d'arrêt total à partir de fiche de rapport des interventions que on a déjà proposé (annexe 2)

- **Le temps net de fonctionnement** = le temps brut de fonctionnement – les micros arrêts.

Et par convention avec les agents de notre service on a constaté que le temps de micro arrêt = 30min par poste.

Et maintenant on est sur la dernière étape pour calculer **le temps utile de fonctionnement**

- **Le temps utile de fonctionnement = le temps requis – le temps d'arrêt de production.**

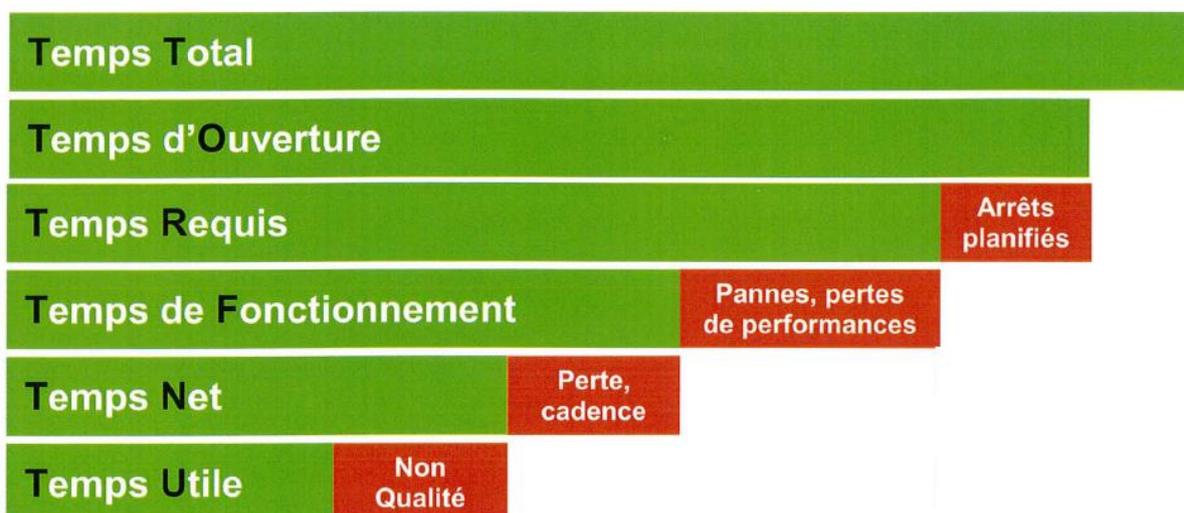


Figure IV.14 : Représentation schématique des temps nécessaires au calcul du Taux de Rendement Synthétique.

Le TRS correspond à la multiplication de ces trois taux. Chacun d'eux étant compris entre 0 et 100%, le TRS sera donc lui aussi compris entre 0 et 100%. Plus un indice de TRS est proche de 100%, plus on a une meilleure efficacité de la ligne.

Donc **T.R.S (Taux de rendement synthétique)** = le temps utile / Temps requis

6. Réalisation d'un tableau de bord pour le service de la maintenance

6.1. Calcul des indicateurs de tableau de bord

6.1.1. Indice de fiabilité : MTBF

MTBF désigne le temps moyen entre défaillances consécutives

MTBF = Somme des Temps de Bon Fonctionnement / nombre de défaillances

- Somme des Temps de Fonctionnement = les heures de marches

- Heures de marches on peut les calculer à partir du compteur d'engins (rapport d'activité Engins Fond).

- nombre de défaillance=nombre d'arrêt. (À partir du rapport des interventions **annexe 2**)

6.1.2. Indice de maintenabilité : MTTR

L'indicateur MTTR (Mean Time To Repair) littéralement : temps moyen pour réparer, exprime la moyenne des temps de tâches de réparation. C'est le temps actif de maintenance, le tout divisé par le nombre d'arrêt.

MTTR = temps d'arrêt total / nombre d'arrêts

6.1.3. Les différentes formes du temps

Le temps requis

Avec :

- Le temps d'ouverture =15 heures par jours
- Le temps total =24 heures par jours
- Le temps requis =temps d'ouverture –temps d'arrêt induit

Et temps d'arrêt induit est composé de : essais, modifications, sous charge, désengagement ...

Et après discussions avec les agents de notre service on a constaté que le temps d'arrêt induit =1 heure par poste

Donc le temps requis =15-3 =12 heures par jour

-Temps d'arrêt de production = temps d'intervention pour une opération de maintenance lorsque on a l'exploitation d'engins

Temps de de bon fonctionnement = Temps requis – Temps d'arrêt de production

- Le temps utile de fonctionnement pour le calculer on doit calculer :
- Le temps brut de fonctionnement
- Le temps net de fonctionnement

6.1.4. Taux de rendement économique

➤ TRE=Taux de rendement économique=Indicateur stratégique d'engagement des moyens de production

Avec TRE=Le temps utile de fonctionnement /Le temps total

7. Le tableau de bord proposé pour le service de la maintenance

Le tableau de bord des engins de fond pour le mois de juillet

TT : Temps Total=24 heures

TO : temps d'Ouverture=Temps total - Fermeture = 24h - (3 Poste * 3 h)= 15 heures par jour

TR : Temps Requis = temps d'ouverture - (Prise en charge + Preventif + Essais + Pausés) = 15h - (3 poste * 1 h) = 12 heures par jour

TBF : Temps de Bon Fonctionnement = Temps Requis -Temps d'arrêt de production

HM : Heures de Marches

TDO: Disponibilite Operationnelle

TU : Taux d'utilisation

TM : Taux de Marche

: engins en arrêt durant le mois du juillet

	Temps Total	Temps Requis	Temps d'arrêt de production	Temps de Bon Fonctionnement	Temps d'ouverture					
	720,00	316,00			395					
Engins	TT	TR		TBF	TO	Total arrêts	HM	TDO	TU	TM
SCOOP/3	720,00	316,00	293,00	23,00	395	294,17	12,00	0,07	11,90	3,04
SCOOP/4	720	316	316	0	395	395	0	0	#DIV/0!	0
SCOOP/7	720,00	316,00	5,25	310,75	395	11,58	78,00	0,98	20,34	19,75
SCOOP/8	720,00	316,00	258,00	58,00	395	259,83	15,00	0,18	11,10	3,80
SCOOP/9	720,00	316,00	86,75	229,25	395	89,42	147,00	0,73	48,10	37,22
SCOOP/10	720,00	316,00	13,50	302,50	395	19,50	16,00	0,96	4,26	4,05
SCOOP/11	720,00	316,00	31,25	284,75	395	38,58	88,00	0,90	24,69	22,28
SCOOP/12	720,00	316,00	27,00	289,00	395	44,67	141,00	0,91	40,25	35,70
SCOOP/13	720,00	316,00	6,75	309,25	395	14,92	121,00	0,98	31,84	30,63
SCOOPS	6480	2844	1037,5	1806,5	3555	1167,67	618,00	0,6351969	25,89	17,38
Toro/1	720,00	316,00	4,25	311,75	395	9,75	118,00	0,99	30,63	29,87
Toro/2	720,00	316,00	13,67	302,33	395	19,25	103,00	0,96	27,41	26,08
Toro/3	720,00	316,00	37,00	279,00	395	52,33	78,00	0,88	22,76	19,75
Toro/4	720	316	316	0	395	395,00	-	0	#DIV/0!	0,00
Toro/6	720	316	316	0	395	395,00	-	0	#DIV/0!	0,00
Toro/7	720,00	316,00	5,00	311,00	395	15,67	56,00	0,98	14,76	14,18
Toro/8	720	316	316	0	395	395,00	-	-	#DIV/0!	0,00
Toro/9	720,00	316,00	103,50	212,50	395	125,42	70,00	0,67	25,97	17,72
Toro/10	720,00	316,00	38,50	277,50	395	47,58	171,00	0,88	49,22	43,29
Toro/11	720,00	316,00	6,00	310,00	395	12,50	182,00	0,98	47,58	46,08
Toro/12	720,00	316,00	8,25	307,75	395	15,42	239,00	0,97	62,96	60,51
TORO	7920	3476	1164,166667	2311,833333	3950	1482,92	1017,00	0,6650844	41,22	25,75
JUMBO/2	720	316	316	0	395	395,00	-	0	#DIV/0!	0,00
JUMBO/4	720,00	316	94,75	221,25	395	99,67	31,00	0,70	10,50	7,85
JUMBO/5	720,00	316	118,25	197,75	395	145,33	29,00	0,63	11,62	7,34
JUMBO/6	720,00	316	77,75	238,25	395	96,08	40,00	0,75	13,38	10,13
JUMBO/7	720,00	316	226,25	89,75	395	149,33	23,00	0,28	9,36	5,82
JUMBO/8	720,00	316	56,75	259,25	395	69,87	39,00	0,82	12,00	9,87
JUMBO/9	720,00	316	17,50	298,50	395	24,17	35,00	0,94	9,44	8,86
JUMBO/10	720,00	316	19,92	296,08	395	45,67	32,00	0,94	9,16	8,10
JUMBO/11	720,00	316	77,58	238,42	395	85,33	65,00	0,75	20,99	16,46
JUMBO/12	720,00	316	22,75	293,25	395	35,25	29,00	0,93	8,06	7,34
JUMBO	7200	3160	1027,5	2132,5	3950	1145,70	323,00	0,6748418	11,52	8,18
Dumper wagner	720,00	316,00	5,00	311	395	8,50	7,00	0,98	1,81	1,77
Plate forme 1	720	316	316	0	395	395,00	-	0	#DIV/0!	0,00
Plate forme 2	720,00	316	5,00	311,00	395	6,92	107,00	0,98	27,57	27,09
DUMPER	2160	948	326	622	1185	410,42	114,00	0,6561181	14,72	9,62

Equipement	Temps Total	Temps Requis	Temps d'arrêt de production	Temps de Bon Fonctionnement	To	Total arrêts	HM	TDO	TU	TM
Engins fond	23760	10428	3555,166667	6872,833333	12640,00	4206,70	2072,00	0,66	62,07	61,61

	Temps Total	Temps Requis	Temps d'arrêt de production	Temps de Bon Fonctionnement	Temps d'ouverture					
Engins Jour	TT	TR		TBF	TO	Total arrêts	HM	TDO	TU	TM
Perlini/1	720,00	351,00	6,70	344,30	351,00	67,00	135,00	0,98	47,54	38,46
Perlini/4	720,00	351,00	3,90	347,10	351,00	39,00	165,00	0,99	52,88	47,01
Perlini/5	720,00	351,00	8,40	342,60	351,00	84,00	170,00	0,98	63,67	48,43
Astra/7	720,00	351,00	-	351,00	351,00	10,00	10,00	1,00	2,85	2,85
CAMIONS CARRIERE	2 880,00	1 404,00	19,00	1 385,00	1404,00	190,00	480,00	0,99	39,54	34,19
Pelle Komatsu/P	720,00	351,00	8,00	343,00	351,00	80,00	180,00	0,98	66,42	51,28
Pelle Michigan	720,00	351,00	4,90	346,10	351,00	49,00	110,00	0,99	36,42	31,34
PELLES CARRIERE	1 440,00	702,00	12,90	689,10	702,00	129,00	290,00	0,98	50,61	41,31
Grue	720,00	351,00	8,70	342,30	351,00	87,00	182,00	0,98	68,94	51,85
Hyster/1	720,00	351,00	3,30	347,70	351,00	33,00	83,00	0,99	26,10	23,65
Hyster/2	720,00	351,00	3,40	347,60	351,00	34,00	135,00	0,99	42,59	38,46
MANUTETION	2 160,00	1 053,00	15,40	1 037,60	1053,00	154,00	400,00	0,99	44,49	37,99

Equipement	Temps Total	Temps Requis	Temps d'arrêt de production	Temps de Bon Fonctionnement	To	Total arrêts	HM	TDO	TU	TM
Engins Jour	6 480,00	3 159,00	47,30	3 111,70	3159,00	473,00	1170,00	0,99	62,07	61,61

Le tableau de bord des engins de fond pour le mois de juillet par zone

TT : Temps Total=24 heures

TO : temps d'Ouverture=Temps total - Fermeture = 24h - (3 Poste * 3 h)= 15 heures par jour

TR : Temps Requis = temps d'ouverture - (Prise en charge + Preventif + Essais + Pauses) = 15h - (3 poste * 1 h) = 12 heures par jour

TBF : Temps de Bon Fonctionnement = Temps Requis -Temps d'arrêt de production

HM : Heures de Marches

TDO: Disponibilite Operationnelle

TU : Taux d'utilisation

TM : Taux de Marche

 : engins en arrêt durant le mois du juin et maintenant en bon état

		Temps Total	Temps Requis	Temps d'arrêt de production	Temps de Bon Fonctionnement	Temps d'ouverture					
		720,00	316,00			395					
Engins Fond		TT	TR		TBF	TO	Total arrêts	HM	TDO	TU	TM
Carrière	Toro7	720,00	316,00	5,00	311,00	395	15,67	56,00	0,98	0,15	14,18
	Toro10	720,00	316,00	38,50	277,50	395	47,58	171,00	0,88	0,49	43,29
	Toro2	720,00	316,00	13,67	302,33	395	19,25	103,00	0,96	0,27	26,08
	JUMBO/5	720,00	316	118,25	197,75	395	145,33	29,00	0,63	0,12	7,34
	JUMBO/6	720,00	316	77,75	238,25	395	96,08	40,00	0,75	0,13	10,13
	engins Carrière	3600,00	1580,00	253,17	1326,83	1975,00	323,92	399,00	0,84	23%	20,2025316
Puits E	Toro11	720,00	316,00	6,00	310,00	395	12,50	182,00	0,98	0,48	46,08
	SCOOP/3	720,00	316,00	293,00	23,00	395	294,17	12,00	0,07	0,12	3,04
	Toro12	720,00	316,00	8,25	307,75	395	15,42	239,00	0,97	0,63	60,51
	SCOOP/13	720,00	316,00	6,75	309,25	395	14,92	121,00	0,98	0,32	30,63
	JUMBO/11	720,00	316	77,58	238,42	395	85,33	65,00	0,75	0,21	16,46
	JUMBO/8	720,00	316	56,75	259,25	395	69,87	39,00	0,82	0,12	9,87
	Plate forme 2	720,00	316	5,00	311,00	395	6,92	107,00	0,98	0,28	27,09
	engins Puits E	5040,00	1896,00	453,33	1758,67	2765,00	499,12	765,00	0,93	0,31	27,67
Igoudrane	SCOOP/10	720,00	316,00	13,50	302,50	395	19,50	16,00	0,96	0,04	4,05
	SCOOP/11	720,00	316,00	31,25	284,75	395	38,58	88,00	0,90	0,25	22,28
	SCOOP/12	720,00	316,00	27,00	289,00	395	44,67	141,00	0,91	0,40	35,70
	JUMBO/7	720,00	316,00	226,25	89,75	395	149,33	23,00	0,28	0,09	5,82
	JUMBO/10	720,00	316,00	19,92	296,08	395	45,67	32,00	0,94	0,09	8,10
	Dumper wagner	720,00	316,00	5	311	395	8,50	7,00	0,98	0,02	1,77
	engins Igoudrane	4320,00	1896,00	322,92	1573,08	2370,00	306,25	307,00	0,83	0,15	12,95
Puits 3	SCOOP/7	720,00	316,00	5,25	310,75	395	11,58	78,00	0,98	0,20	19,75
	SCOOP/8	720,00	316,00	258,00	58,00	395	259,83	15,00	0,18	0,11	3,80
	SCOOP/9	720,00	316,00	86,75	229,25	395	89,42	147,00	0,73	0,48	37,22
	Toro1	720,00	316,00	4,25	311,75	395	9,75	118,00	0,99	0,31	29,87
	Toro3	720,00	316,00	37,00	279,00	395	52,33	78,00	0,88	0,23	19,75
	Toro9	720,00	316,00	103,50	212,50	395	125,42	70,00	0,67	0,26	17,72
	JUMBO/9	720,00	316,00	17,50	298,50	395	24,17	35,00	0,94	0,09	8,86
	JUMBO/12	720,00	316,00	22,75	293,25	395	35,25	29,00	0,93	0,08	7,34
	engins Puits 3	5760,00	2528,00	535,00	1993,00	3160,00	607,75	570,00	0,79	0,22	18,04

Géologie		Temps Total	Temps Requis	Temps d'arrêt de production	Temps de Bon Fonctionnement	Temps d'ouverture	Total arrêts	HM	TDO	TU	TM
JUMBO/4	720,00	316,00	18,75	297,25	395	23,67	31,00	0,94	0,08	0,08	

Engins en arrêt du Mois		Temps Total	Temps Requis	Temps d'arrêt de production	Temps de Bon Fonctionnement	Temps d'ouverture	Total arrêts	HM	TDO	TU	TM
Atelier	Toro6	720,00	316,00	316,00	-	395	395	0,00	0,00	#DIV/0!	0,00
	Toro4	720,00	316,00	316,00	-	395	395	0,00	0,00	#DIV/0!	0,00
	SCOOP/4	720,00	316,00	316,00	-	395	395	0,00	0,00	#DIV/0!	0,00
	Plate forme 1	720,00	316,00	316,00	-	395	395	0,00	0,00	#DIV/0!	0,00
	JUMBO/2	720,00	316,00	316,00	-	395	395	0,00	0,00	#DIV/0!	0,00
	Toro8	720,00	316,00	316,00	-	395	395	0,00	0,00	#DIV/0!	0,00

Les Indicateurs de Performance

TRS= taux de Rendement Synthétique
 TRG=Taux de Rendement Globale
 TRE=Taux de Rendement Economique
 TP = Taux de Performance
 TQ = Taux de Qualité

Engins	Temps Total	Temps d'ouverture	Temps requis	Temps d'arrêt Total	Temps d'arrêt de production	Temps Brut de fonctionnement	Temps Net de fonctionnement	Temps utile de fonctionnement	TRS	TRE	TP	TQ
SCOOP/3	720.00	395.00	316.00	294.17	293.00	100.83	61.33333333	23.00	0.07278481	0.03194444	0.61	0.38
SCOOP/4	720.00	395.00	316.00	395.00	316.00	-	-	-	-	-	-	-
SCOOP/7	720.00	395.00	316.00	11.58	5.25	383.42	343.9166667	310.75	0.98338608	0.43159722	0.90	0.90
SCOOP/8	720.00	395.00	316.00	259.83	258.00	135.17	95.66666667	58.00	0.1835443	0.08055556	0.71	0.61
SCOOP/9	720.00	395.00	316.00	89.42	86.75	305.58	266.0833333	229.25	0.72547468	0.31840278	0.87	0.86
SCOOP/10	720.00	395.00	316.00	19.50	13.50	375.50	336	302.50	0.95727848	0.42013889	0.89	0.90
SCOOP/11	720.00	395.00	316.00	38.58	31.25	356.42	316.9166667	284.75	0.90110759	0.39548611	0.89	0.90
SCOOP/12	720.00	395.00	316.00	44.67	27.00	350.33	310.8333333	289.00	0.91455696	0.41938889	0.89	0.93
SCOOP/13	720.00	395.00	316.00	14.92	6.75	380.08	340.5833333	309.25	0.97863924	0.42951389	0.90	0.91
SCOOPS	6,480.00	3,555.00	2,844.00	1,167.67	1,037.50	2,387.33	2,071.33	1,806.50	0.64	0.28	0.87	0.87
Toro/1	720.00	395.00	316.00	9.75	4.25	385.25	345.75	311.75	0.98655063	0.43298611	0.90	0.90
Toro/2	720.00	395.00	316.00	19.25	13.67	375.75	336.25	302.33	0.95675105	0.41990741	0.89	0.90
Toro/3	720.00	395.00	316.00	52.33	37.00	342.67	303.1666667	279.00	0.88291139	0.3875	0.88	0.92
Toro/4	720.00	395.00	316.00	395.00	316.00	-	-	-	-	-	-	-
Toro/6	720.00	395.00	316.00	395.00	316.00	-	-	-	-	-	-	-
Toro/7	720.00	395.00	316.00	15.67	5.00	379.33	339.8333333	311.00	0.98417722	0.43194444	0.90	0.92
Toro/8	720.00	395.00	316.00	395.00	316.00	-	-	-	-	-	-	-
Toro/9	720.00	395.00	316.00	125.42	103.50	269.58	230.0833333	212.50	0.67246835	0.29513889	0.85	0.92
Toro/10	720.00	395.00	316.00	47.58	38.50	347.42	307.9166667	277.50	0.87816456	0.38541667	0.89	0.90
Toro/11	720.00	395.00	316.00	12.50	6.00	382.50	343	310.00	0.98101266	0.43055556	0.90	0.90
Toro/12	720.00	395.00	316.00	15.42	8.25	379.58	340.0833333	307.75	0.97389241	0.42743056	0.90	0.90
TORO	7,920.00	4,345.00	3,476.00	1,482.92	1,164.17	2,862.08	2,546.08	2,311.83	0.67	0.29	0.89	0.91
JUMBO/2	720.00	395.00	316.00	395.00	316.00	-	-	-	-	-	-	-
JUMBO/4	720.00	395.00	316.00	99.67	94.75	295.33	255.8333333	221.25	0.70015823	0.30729167	0.87	0.86
JUMBO/5	720.00	395.00	316.00	145.33	118.25	249.67	210.1666667	197.75	0.62579114	0.27465278	0.84	0.94
JUMBO/6	720.00	395.00	316.00	96.08	77.75	298.92	259.4166667	238.25	0.75395507	0.33090278	0.87	0.92
JUMBO/7	720.00	395.00	316.00	149.33	226.25	245.67	206.1666667	89.75	0.28401899	0.12465278	0.84	0.44
JUMBO/8	720.00	395.00	316.00	69.87	56.75	325.13	285.6333333	259.25	0.82041139	0.36006944	0.88	0.91
JUMBO/9	720.00	395.00	316.00	24.17	17.50	370.83	331.3333333	298.50	0.94462025	0.41458333	0.89	0.90
JUMBO/10	720.00	395.00	316.00	45.67	19.92	349.33	309.8333333	296.08	0.93697257	0.41122685	0.89	0.96
JUMBO/11	720.00	395.00	316.00	85.33	77.58	309.67	270.1666667	238.42	0.75448312	0.33113426	0.87	0.88
JUMBO/12	720.00	395.00	316.00	35.25	22.75	359.75	320.25	293.25	0.92800633	0.40729167	0.89	0.92
JUMBO	7,200.00	3,950.00	3,160.00	1,145.70	1,027.50	2,804.30	2,448.80	2,132.50	0.67	0.30	0.87	0.87
Dumper wagner	720.00	395.00	316.00	8.50	5.00	386.50	347	311.00	0.98417722	0.43194444	0.90	0.90
Plate forme 1	720.00	395.00	316.00	395.00	316.00	-	-	-	-	-	-	-
Plate forme 2	720.00	395.00	316.00	6.92	5.00	388.08	348.5833333	311.00	0.98417722	0.43194444	0.90	0.89
DUMPER	2,160.00	1,185.00	948.00	410.42	326.00	774.58	695.58	622.00	0.66	0.29	0.90	0.89
Equipement	Temps Total	temps d'ouve	temps requis	Temps d'arrêt	Temps d'arrêt de production	Temps Brut de fonctionnement	temps Net de fonctionnement	temps utile de fonctionnement	TRS	TRE	TP	TQ
Engins fond	23,760.00	13,035.00	10,428.00	4,206.70	3,555.17	8,828.30	7,761.80	6,872.83	0.66	0.29	0.88	0.89
Engins Jour												
Perlini/1	720.00	351.00	216.00	67.00	6.70	284.00	244.5	209.30	0.96898148	0.29069444	0.86	0.86
Perlini/4	720.00	351.00	216.00	39.00	3.90	312.00	272.5	212.10	0.98194444	0.29458333	0.87	0.78
Perlini/5	720.00	351.00	216.00	84.00	8.40	267.00	227.5	207.60	0.96111111	0.28833333	0.85	0.91
Astra/7	720.00	351.00	216.00	-	-	351.00	311.5	216.00	1	0.3	0.89	0.69
CAMIONS CARRIERE	2,880.00	1,404.00	864.00	190.00	19.00	1,214.00	1,056.00	845.00	0.98	0.29	0.87	0.80
Pelle Komatsu/P	720.00	513.50	216.00	80.00	8.00	433.50	394	208.00	0.96296296	0.28888889	0.91	0.53
Pelle Michigan	720.00	513.50	216.00	49.00	4.90	464.50	425	211.10	0.97731481	0.29319444	0.91	0.50
PELLES CARRIERE	1,440.00	1,027.00	432.00	129.00	12.90	898.00	819.00	419.10	0.97	0.29	0.91	0.51
Grue	720.00	351.00	216.00	87.00	8.70	264.00	224.5	207.30	0.95972222	0.28791667	0.85	0.92
Hyster/1	720.00	351.00	216.00	33.00	3.30	318.00	278.5	212.70	0.98472222	0.29541667	0.88	0.76
Hyster/2	720.00	351.00	216.00	34.00	3.40	317.00	277.5	212.60	0.98425926	0.29527778	0.88	0.77
MANUTETION	2,160.00	1,053.00	648.00	154.00	15.40	899.00	780.50	632.60	0.98	0.29	0.87	0.81
Equipement	Temps Total	temps d'ouve	temps requis	Temps d'arrêt	Temps d'arrêt de production	Temps Brut de fonctionnement	temps Net de fonctionnement	temps utile de fonctionnement	TRS	TRE	TP	TQ
Engins Jour	6,480.00	3,484.00	1,944.00	473.00	47.30	3,011.00	2,655.50	1,896.70	0.98	0.29	0.88	0.71

Après les calculs de la première partie pour les TORO et les JUMBO on a trouvé que les engins les plus critiques sont les JUMBO N°5 avec un temps d'arrêt de 593 heures et le TORO N°7 avec temps d'arrêt de 595.5 heures

8. Calcul de MTBF

8.1. MTBF pour le TORO N°7

	Cardan	Frein de parck	Les manettes de godet et de direction
Temps requis (heures)	$316 * 6 = 1896$	$316 \text{ (heures)} * 6 = 1896$	$316 \text{ (heures)} * 6 = 1896$
Temps d'arrêt (heures)	144	24	21
Nombre des interventions	48 fois durant les 6 mois	12 fois durant les 6 mois	14 fois durant les 6 mois
MTBF (heures)	36.5	156	133.92
MTTR (heures)	3	2	1.5

Tableau IV.9.MTBF et MTTR pour les trois organes de l'engin TORO

8.2.- MTBF pour le JUMBO N°5

	Marteau	Glissière	Les axes des vérins
Temps requis (heures)	$316 \text{ (heures)} * 6 = 1896$	$316 \text{ (heures)} * 6 = 1896$	$316 \text{ (heures)} * 6 = 1896$
Temps d'arrêt (heures)	96	156	36
Nombre des interventions	48 fois durant les 6 mois	156 fois durant les 6 mois	18 fois durant les 6 mois
MTBF (heures)	37.5	11.15	103.33
MTTR (heures)	2	1	2

Tableau IV.10: MTBF et MTTR pour les trois organes de l'engin JUMBO

9. Solutions proposés

Pour assurer une meilleure fiabilité des éléments critiques on va appliquer une maintenance systématique sur les éléments suivants : cardans, les manettes de godet et de direction, les freins de parc Marteau, la glissière.

Organe	Cardan	Frein de parc	les manette de godet et de direction
Les actions de maintenance	<p>MTBF = 36.5 Heures de marche =3 jours Donc le contrôle chaque 3 Jours Ce contrôle comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contrôle de serrage des boulons. -Utiliser des écrous nylstop. -Graissage des paliers et des croisillons. -Mettre en place des protections des joints de cardan. 	<p>MTBF = 156 Heures de marche = 13 jours. Donc le contrôle chaque 13 Jours Ce contrôle comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Contrôle d'usure des plaquettes et changement en cas d'usure -n'activer le frein de parc que si l'engin est en arrêt. -Contrôle d'efficacité (activer le frein de parc et mettre le sélecteur de vitesse en 2eme et accélérer à fond, il ne doit pas bouger) 	<p>MTBF = 133.92 Heures de marche =11 jours Donc le contrôle chaque 13 Jours Ce contrôle comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Contrôle du jeu. -Changement périodiques des poussoirs pour éviter les fuites.

Tableau IV.11. Les actions de maintenance pour les trois organes de l'engin TORO

Organe	Marteau	Glissière	Les axes des vérins
Les actions de maintenance	<p>MTBF = 37.5 Heures de marche =3 jours Donc le contrôle chaque 3 Jours Ce contrôle comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Révision générale. -Graissage du réducteur. -Serrage des boulons. -Contrôle les joints du piston périodiquement. 	<p>MTBF = 11.5 Heures de marche Donc le contrôle chaque 11.5 Heures de marche Ce contrôle comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Vérification les jeux. -vérification l'usure de fixation. -Contrôle les solides barres. 	<p>MTBF = 103.33Heures de marche =8 jours Donc le contrôle chaque 8 Jours Ce contrôle comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Graissage périodiquement chaque 8 heures de fonctionnement selon le catalogue. -contrôle l'usure des bagues et les changer pour éviter le jeu.

Tableau IV.12. Les actions de maintenance pour les trois organes de l'engin JUMBO

10. Conclusion de l'étude de cas N°1

On a pu mettre en évidence les équipements sur lesquelles le service maintenance devrait porter l'attention. Les études PARETO et AMDEC ont été effectuées pour détecter les équipements qui ont causé le plus de problème à la production. On a choisi cet outil d'analyse car non seulement il traite les vraies causes des défaillances les plus critiques mais elle peut également alimenter la maintenance des équipements.

La création d'un tableau de bord qu'il faut l'appliquer au niveau du service mécanique des engins de fond afin de suivre les indicateurs de performance durant l'utilisation.

On a terminé par une étude et l'analyse de fiabilité durant lequel on a pu estimer le temps moyen entre deux défaillances des équipements critiques de l'entreprise.

Une bonne gestion de l'exploitation de l'équipement peut améliorer la fiabilité de celle-ci. En effet la façon dont on utilise la machine a des répercussions dans son cycle de vie, c'est pourquoi on a proposé de calculer le taux de rendement synthétique (TRS) dans le nouveau tableau de bord et cela dans le but d'avoir une vision globale sur l'utilisation de la machine et de l'optimiser.

Etude de cas N°2 : au sein d'une cimenterie

1. Introduction :

L'élaboration d'un plan de production revient non seulement à prendre les mesures nécessaires pour atteindre les objectifs de production tracés mais aussi il faut maîtriser et augmenter la disponibilité des machines de production.

Suivant cette nouvelle conjoncture, la cimenterie a entrepris de nombreuses études visant à maintenir son positionnement vis-à-vis de la concurrence. Parmi les aboutissements de ces études des changements au niveau des matières premières utilisées lors du processus de fabrication du ciment, ce qui a engendré des répercussions néfastes sur la productivité de la cimenterie, et plus précisément sur le débit de l'atelier de broyage.

Notre projet qui nous a été proposé par le groupe à travers sa direction procédés et maintenance de la cimenterie est un enchaînement logique de cette nouvelle stratégie de production qui vise l'optimisation de l'atelier de broyage ciment. Il a comme principaux objectifs :

- Le diagnostic des causes de chutes de débits au sein de l'atelier de broyage ;
- L'analyse des modes de défaillances et de leur effet et criticité (AMDEC) du broyeur ;
- Inspection interne du broyeur ;

2. Le broyeur à boulet

Après avoir obtenu le clinker, ce dernier doit être finement broyé avec addition du gypse et d'autres ajouts pour donner un ciment aux propriétés hydrauliques actives.

Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, dispositifs cylindriques chargés de boulets d'acier et mis en rotation. Le broyeur à boulets est divisé en deux compartiments recouverts de plaques de blindage en acier, le premier étant moins long que le deuxième.

Le clinker en entrée, est broyé dans le premier compartiment, où des boulets en acier de tailles échelonnées (entre Ø90 et Ø 50 mm) sont utilisés comme corps bruyants.

Le deuxième compartiment assure le broyage fin à l'aide de boulets plus petits

(entre $\varnothing 50$ et $\varnothing 15$ mm).

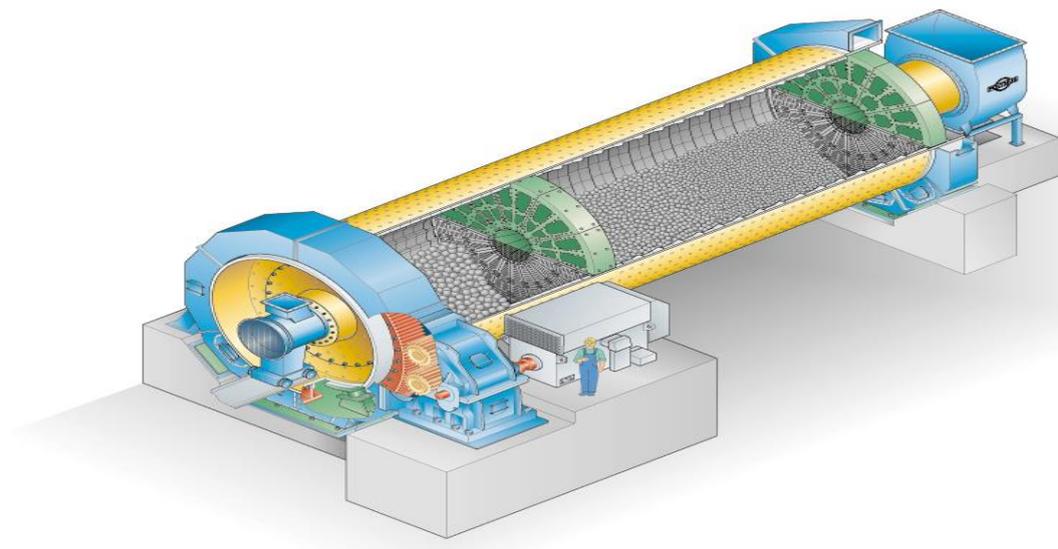
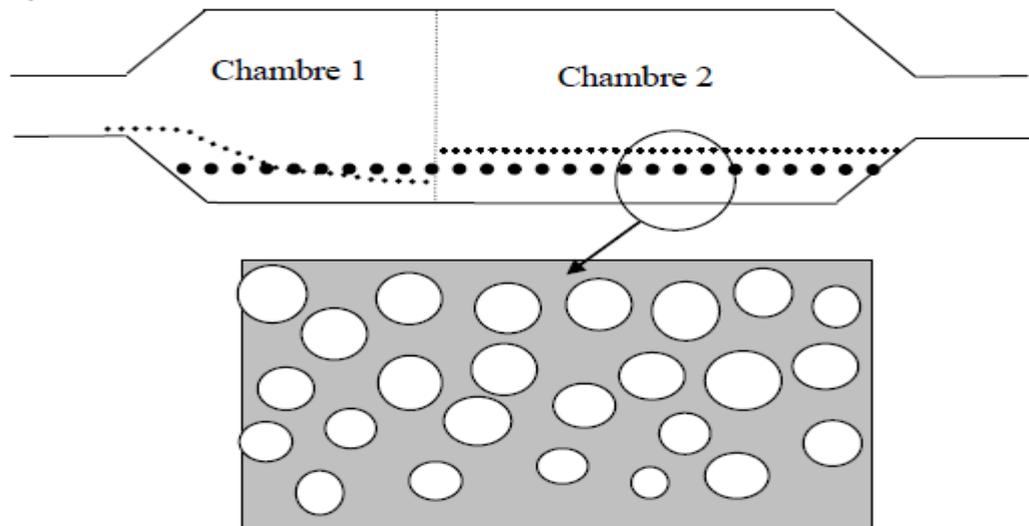


Figure IV.15 : schéma simplifié du broyeur

Un diaphragme (cloison intermédiaire) sépare les deux compartiments, et ne laisse transiter que les grains de taille suffisamment réduite pour procéder au broyage fin.

Le clinker broyé, dont 100% passe au tamis de $90 \mu\text{m}$, sort du broyeur par la grille de décharge (cloison de sortie) qui empêche les boulets de sortir du deuxième compartiment.

Les modes de réduction de matière :

Dans le broyeur à boulets, les trois modes de réduction de la matière qui sont la fracture, piquage et l'attrition (frottement) sont plus ou moins mis en jeu selon la vitesse de rotation utilisée. Il existe plusieurs états de broyage selon la vitesse de rotation. Parmi eux, si la vitesse est faible, un état de glissement de la matière donne lieu à un broyage par attrition. Lorsque la vitesse est trop importante, toute la matière est plaquée contre les parois du broyeur, et la fragmentation ne peut pas se produire. Dans un broyeur à boulets ayant une vitesse intermédiaire entre les deux précédentes, le régime de cascade est atteint. Les nodules de clinker sont réduits grâce aux modes de broyage par fracture, par piquage et par attrition.

D'autre part, le blindage joue un rôle important sur les modes de réduction de matière. Pour le compartiment 1 du broyeur, des blindages releveurs permettent de soulever les boulets plus hauts et en grands nombre pour privilégier le mode Cataracte, qui a pour but de fracturer les particules pour avoir plusieurs plus petites, cependant ce mode ne produit pas des particules très fines.

Pour le compartiment 2, des blindages classant sont installés pour classer les boulets en éjectant les boulets les plus grands plus loin que le petit tout au long de la chambre.

Le classement de la charge est un paramètre important pour l'efficacité du second compartiment. En effet, pour réaliser la réduction granulométrique de la matière, il est nécessaire d'adapter la taille des boulets aux grains que l'on veut broyer. Ainsi les gros grains (2 mm) nécessitent des boulets de 50 mm pour être broyés efficacement alors que le broyage des grains de 300 μm demande des boulets de 20 mm.

3. Problématique

Tenant compte des nouvelles données du marché le directoire de la cimenterie a entrepris une série de changements afin de maintenir son positionnement concurrentiel. L'usine ne fait pas cas d'exception de cette nouvelle vague de changements basés essentiellement sur le changement de la matière première utilisée.

Le changement majeur intervient au niveau de l'étape du broyage cru du procédé de fabrication ce qui a induit une chute de débit très importante.

C'est suivant cette problématique qu'il nous a été demandé d'optimiser

les performances de l'atelier de broyage de la cimenterie, à avoir le débit de production du ciment produit.

Mais avant d'aboutir à cet objectif, il s'avère nécessaire de diagnostiquer les modes de défaillances de l'atelier de broyage afin de focaliser notre étude sur les éléments les plus critiques de l'atelier. Ceci va nous servir bien évidemment pour dresser des solutions visant l'optimisation de l'atelier de broyage.

4. Diagnostic des causes de chutes de débit du broyeur

Le diagnostic des causes de la chute de débit, va s'opérer comme suit : en premier lieu l'élaboration d'un diagramme cause à effets et l'interprétation de ces résultats, en second lieu pertes de matières, que des pertes de débits. Les équipements dont les performances sont les plus faibles, doivent bénéficier d'une étude fonctionnelle permettant de les décortiquer en sous éléments, afin de proposer des mesures amélioratives par la suite.

4.1. Diagramme de causes à effet

4.1.1. Arbre des causes

Le diagramme de causes à effet ou d'Ishikawa sert à identifier l'ensemble des causes d'un problème et sélectionner celles qui feront l'objet d'une analyse poussée, afin de trouver des solutions. C'est un outil graphique qui sert à comprendre les causes d'un défaut ; il sert à analyser le rapport existant entre un problème et toutes les causes possibles. Le diagramme d'Ishikawa permet :

- De classer les causes liées au problème posé.
- De faire participer chaque membre à l'analyse.
- De limiter l'oubli des causes par le travail de groupe.
- De fournir des éléments pour l'étude ou des solutions où les causes sont réparties selon 5 catégories :
 - Matière (matières premières).
 - Matériel (équipements).
 - Méthode.
 - Main d'œuvre.

- Milieu (environnement).

Pour identifier les causes certaines de la chute de débit de l'atelier de broyage, on va remonter à toutes les causes probables en questionnant tout un groupe de responsables (service procédé, service fabrication, service maintenance) car la construction de diagramme d'Ishikawa ne peut pas être réalisée de façon individuelle.

Les causes qui ont une influence sur le fonctionnement de l'atelier et qui engendrent une chute de débit sont présentées dans le diagramme suivant :

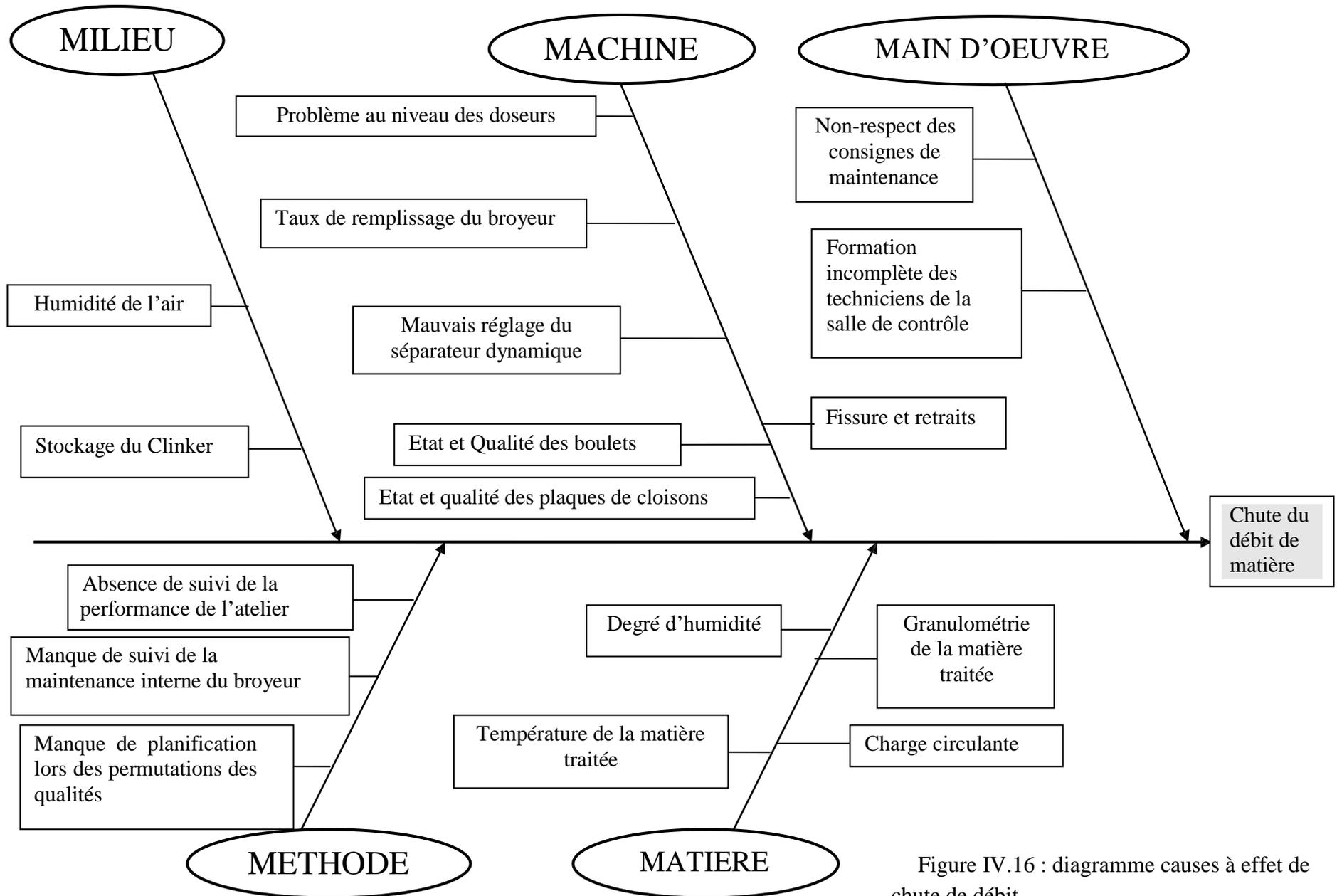


Figure IV.16 : diagramme causes à effet de chute de débit

4.1.2 Analyse des résultats :

Le paragraphe suivant vise à analyser chaque cause, et dégager des solutions pratiques permettant de diminuer l'effet de chaque cause probable.

catégorie	Cause	Solutions et propositions
Milieu	Humidité de l'air ambiant	L'humidité agit directement sur l'agglomération des particules : une déshumidification de l'air ambiant par exemple à l'aide de roue déshydratante
	Stockage du clinker	Eviter le stockage du clinker à l'extérieur à cause de la forte cadence de production : construire un nouveau silo de stockage
Méthode	Absence de suivie de la performance de l'atelier	Lire chaque début de poste les performances de l'atelier.
	Manque de suivi de la maintenance interne du broyeur	Réalisation d'analyse AMDEC afin de dégager les plus critiques
	Manque de la planification de la production lors des permutations des qualités du ciment	Le changement de la qualité fabriqué du ciment (CPJ45, CPJ55, CPJ45 prise mer, CPA65) perturbe le fonctionnement du broyeur : Une bonne planification selon les prévisions de la demande s'avère nécessaire à étudier.
Machines	Taux de remplissage	Trouver le taux de remplissage en boulets selon les valeurs recommandées
	Qualité des boulets et de plaques de cloison	Acheter du matériel de bonne qualité
	Fissures et retrait	réalisation de l'étude AMDEC du broyeur

	Température de la matière traitée	La température du ciment traité ne doit dépasser 110°C : assurer une bonne ventilation pour refroidir le ciment dans le broyeur et dans le séparateur
--	-----------------------------------	---

Machines	Granulométrie de la matière traitée	Chercher des solutions pour améliorer la qualité du clinker fabriqué lors de l'étape de cuisson
	Charge circulante	La quantité de matière circulante dans le circuit de l'atelier doit être optimal pour assurer une meilleure séparation des particules :
Main d'œuvre	Formation incomplète des techniciens de la salle de contrôle	Assurer des formations pour les techniciens en matière d'interprétations des résultats affichés sur le tableau de bord
	Non-respect des consignes de maintenance	Assurer des formations dans le domaine de la maintenance

Tableau IV.13 : causes probables de chute de débit du broyeur

Les résultats tirés de l'analyse des causes à effets, nous permettent de dégager un ensemble d'actions qui vont mener, et de détailler les solutions des problèmes les plus critiques du point de vue impact sur le débit.

5. Analyse de modes de défaillance du broyeur

Pour élaborer une politique d'optimisation efficace, il faudra focaliser les efforts sur les éléments les plus critiques du broyeur. C'est sur ces éléments que je me suis basé pour réaliser une analyse fonctionnelle, sur la base de la méthode APTE suivie d'une analyse AMDEC qui va me permettre de définir les modes de défaillances qui ont un impact négatif sur le rendement du broyeur, de rechercher leurs causes et leurs effets, d'évaluer leurs criticités et de proposer des actions à mener par la suite, afin d'améliorer sa disponibilité sa fiabilité et par voie de conséquence son efficacité.

5.1. Introduction à l'analyse fonctionnelle

La norme X50-150 [134] définit l'analyse fonctionnelle comme étant une démarche qui consiste à recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions d'un produit.

Les fonctions sont les actions d'un produit ou de l'un de ces constituants exprimés exclusivement en termes de finalité.

Au cours de notre étude, on a utilisé la méthode d'inventaire du milieu extérieur. Démarche APTE est une méthode d'analyse fonctionnelle et d'analyse de la valeur. En effet, pour analyser les défaillances d'un système, il est nécessaire tout d'abord de définir d'une manière rigoureuse les fonctions que ce système doit remplir durant son utilisation.

Pour ce faire, on doit identifier la totalité des fonctions de service d'un produit ou d'un équipement à partir des relations de celui-ci avec son environnement. Cette méthode comporte ses propres outils de validation (besoin, fonctions, contraintes).

La méthode est divisée en deux parties essentielles :

- **Analyse externe**

- **Analyse interne**

Dans un premier temps, la méthode identifie en priorité les relations entre deux ou plusieurs inter-acteurs, par l'intermédiaire de l'équipement.

Pour ce faire, on doit respecter l'enchaînement suivant :

- L'analyse du besoin.
- La recherche de l'environnement.
- La détermination des fonctions.

5.2 Enoncé du besoin

Il est nécessaire de se poser des questions fondamentales concernant le véritable objectif de l'équipement :

- **Quelle est son utilité ? A quoi sert-il ?**
- **Sur quoi agit-il ? Sur qui agit-il ?**

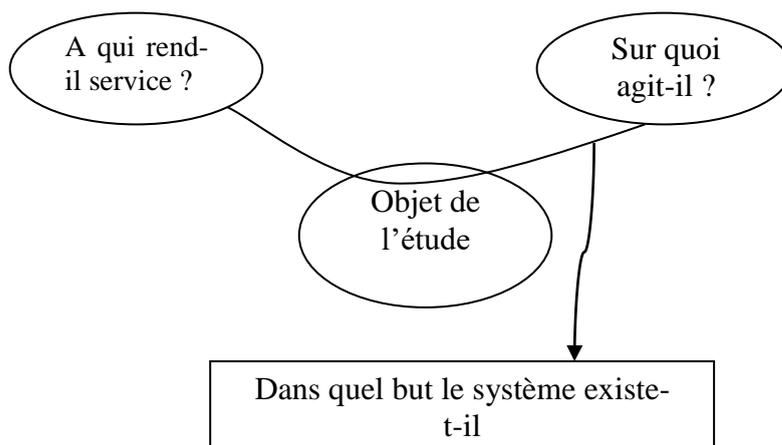


Figure IV.17 : diagramme bête à cornes

La relation qui lie deux milieux passant par le système est une fonction principale. Pour les milieux extérieurs qui restent, il faudra tracer les relations qui les lient au système, c'est ainsi, qu'on détermine les fonctions contraintes, et qu'on les représente par le diagramme de la Pieuvre.

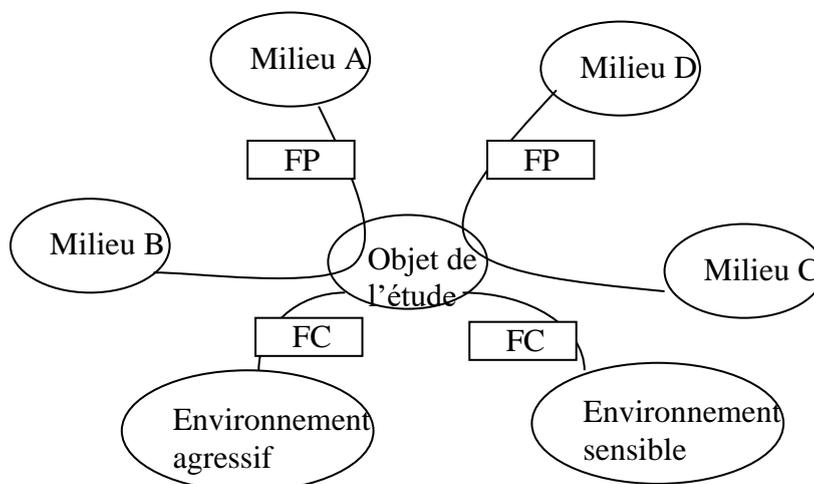


Figure IV.18: Diagramme pieuvre

5.3 Principe de l'analyse fonctionnelle (APTE)

Pour bien comprendre le fonctionnement du système on doit suivre le principe d'une analyse fonctionnelle basée sur la méthode APTE :

- Objet à étudier
- Milieux extérieurs en contacts avec le sujet (contact physique, mécanique,..)
- Identifier les fonctions principales et les contraintes.
- Fonction principale F_p : la relation créée par le système entre deux éléments du milieu extérieur.
- Fonction contrainte F_c : la relation entre un milieu extérieur et l'objet à étudier.

5.4 Architecture du système

Après avoir analysé le système comme étant une boîte noire dont la composition nous est totalement inconnue, on passe à l'analyse fonctionnelle interne de l'équipement. On entre donc, dans la composition du produit.

Dans cette étape, on décompose le système en sous-systèmes. On appelle ce type de décomposition, une décomposition topo fonctionnelle et industrielle.

En fait, il s'agit d'une décomposition physique du système, validée par une analyse fonctionnelle. Les sous-systèmes se décomposent à leur niveau de la même manière. Cela se traduit donc, par la définition de l'architecture du système.

5.2. Préparation de l'analyse des défaillances de leurs effets et leur Criticité (AMDEC)

La préparation du travail est une étape cruciale pour garantir la pertinence des résultats, elle se compose des étapes suivantes :

- Délimitation de l'étude (les unités maintenables les plus critiques au sein de la chaîne de production du ciment) ;
- La composition du groupe de travail ;
- L'élaboration d'un planning pour organiser le travail ;

- Préparation des supports d'étude ;

La réalisation des fiches AMDEC nécessite la détermination du niveau de décomposition hiérarchique en autant de niveaux qu'il sera nécessaire. Le dernier niveau correspond en général au dernier composant remplaçable. Le résultat de ces analyses est ensuite regroupé dans un tableau qui résume les effets des défaillances sur les fonctions assurées par les éléments du système.

L'utilisation de ces tableaux à des fins de diagnostic conduit à utiliser une procédure déductive. Pour un mode de défaillance observé par des opérateurs, il convient de rechercher toutes les causes de défaillances ayant conduit à la perte de la fonction.

5.2.1 Constitution du groupe de travail

Participer et assister à une cellule de travail faisant appel à plusieurs corps de métiers à savoir le département exploitation et Maintenance ne peut être que fructifiant car celle-ci permet une synergie entre les différents intervenants et ainsi un meilleur échange conduisant à une flexibilité afin de maîtriser et prendre en main au mieux les processus de fabrications par les hommes.

L'AMDEC nécessitant le retour d'expérience afin de rassembler les données nécessaire à analyser ainsi dans cet objectif, j'ai sollicité la participation des responsables des différents services

- Le responsable du service procédé ;
- Le responsable du département fabrication ;
- Le responsable du département maintenance ;

5.2.2 Préparation de documents des fiches AMDEC

Avant d'entamer la démarche AMDEC, on a préparé avec l'assistance du groupe les documents suivants :

- Grille de cotation ;
- Tableau AMDEC pour la saisie ;

5.2.3. Barème de cotation

L'élaboration d'un barème de cotation permet d'établir un référentiel unique pour l'évaluation de la criticité des défaillances. Cette cotation se base sur les critères suivant :

- Le référentiel de cotation de l'entreprise ;
- L'expérience des responsables ;
- Le niveau de sécurité souhaité ;
- Le niveau de qualité et les normes d'environnement à respecter.

Le système de cotation permet de :

- Evaluer la criticité de chaque unité maintenable à l'aide de trois paramètres : la fréquence ou l'occurrence de défaillance, sa gravité et sa détection ;
- Homogénéiser la cotation pour faciliter son utilisation ;
- Classer les unités maintenables selon les plus critiques ;

Les paramètres utilisés pour l'élaboration de ce barème sont définis comme suit :

❖ **Fréquence F** : elle représente le risque que la cause potentielle de la défaillance survienne et qu'elle entraîne le mode de défaillance considéré.

❖ **Gravité G** : elle représente la gravité ou la sévérité de l'effet de chaque défaillance.

❖ **Détection D** : elle représente la probabilité que le mode de défaillance peut être décelé par l'exploitant ; ce critère suppose l'existence d'une anomalie observable ainsi que celle du moyen mis en œuvre afin de la détecter.

La criticité correspond au produit des indices cités plus haut, ceci dans le but de hiérarchiser les défaillances potentielles : $C = F * G * D$

Les critères sont estimés à l'aide des tableaux de cotation suivant comme il a été convenu lors des cellules de travail :

❖ **Indice de fréquence F**

Valeurs de F	Probabilité d'apparition de la défaillance
1	1 défaillance par an
2	1 défaillance par 3 mois
3	1 défaillance par mois
4	1 défaillance par 2 semaines

Tableau IV. 14 : échelle de notation de la fréquence

❖ **Indice de gravité**

Valeur de G	Critères
1	Défaillance mineure, n'ayant aucun impact sur le débit du BK4, la sécurité ou sur l'environnement.
2	Défaillance moyenne, provoquant une baisse de 5 % du débit du BK4.
3	Défaillance importante, provoquant une baisse du débit de 10 % ou un arrêt unité inférieur à 2 jours.
4	Défaillance grave, provoquant un arrêt unité supérieur à 3 jours ; et une baisse du débit de plus de 15%.

Tableau IV. 15 : Echelle de notation de la gravité

❖ **Indice de non détection D**

Valeurs de D	Critères
1	La détection totale de la cause initiale ou signe avant l'apparition de la défaillance (bruit, vibration, jeu anormal, échauffement, etc).
2	Il existe un signe avant-coureur de la défaillance mais l'apparition de la défaillance n'est pas visible par l'exploitant. la détection est exploitable.
3	Le signe ; la cause ou le mode de défaillance avant l'apparition de la défaillance n'est pas facilement décelable.
4	Il n'existe aucun signe avant l'apparition de la défaillance. Non Détectable.

Tableau IV. 16 : Echelle de notation de non détection

5.3. Réalisation de l'AMDEC du broyeur**5.3.1 Description du broyeur :**

Il s'agit d'un broyeur à boulet alimenté en clinker, gypse et calcaire à partir de silos de stockage de ces matières, par un ensemble de doseurs et de transporteur à bande.

Le broyeur ciment du type horizontal à boulets est constitué de deux chambres séparées par une cloison intermédiaire dont les corps broyant font écraser par choc les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état fine (ne comportant que très peu de grains supérieurs à 63 µm).

5.3.2 Caractéristiques techniques :

Indications relatives à l'emploi prévu du broyeur

Matière à broyer	clinker / gypse / calcaire / cendre
Granulométrie	0 – 50 mm
Année de construction	2005
Diamètre nominal	5000 mm
Longueur nominale	14420mm mm
Débit	180T/h
Longueur nominale compartiment "I"	3958 mm
Longueur nominale compartiment "II"	9187 mm
Niveau de remplissage total compartiment "I"	28 %
Niveau de remplissage total compartiment "II"	28 %

Tableau IV. 17: les caractéristiques techniques

5.3.3 Analyse externe

Analyse du besoin :

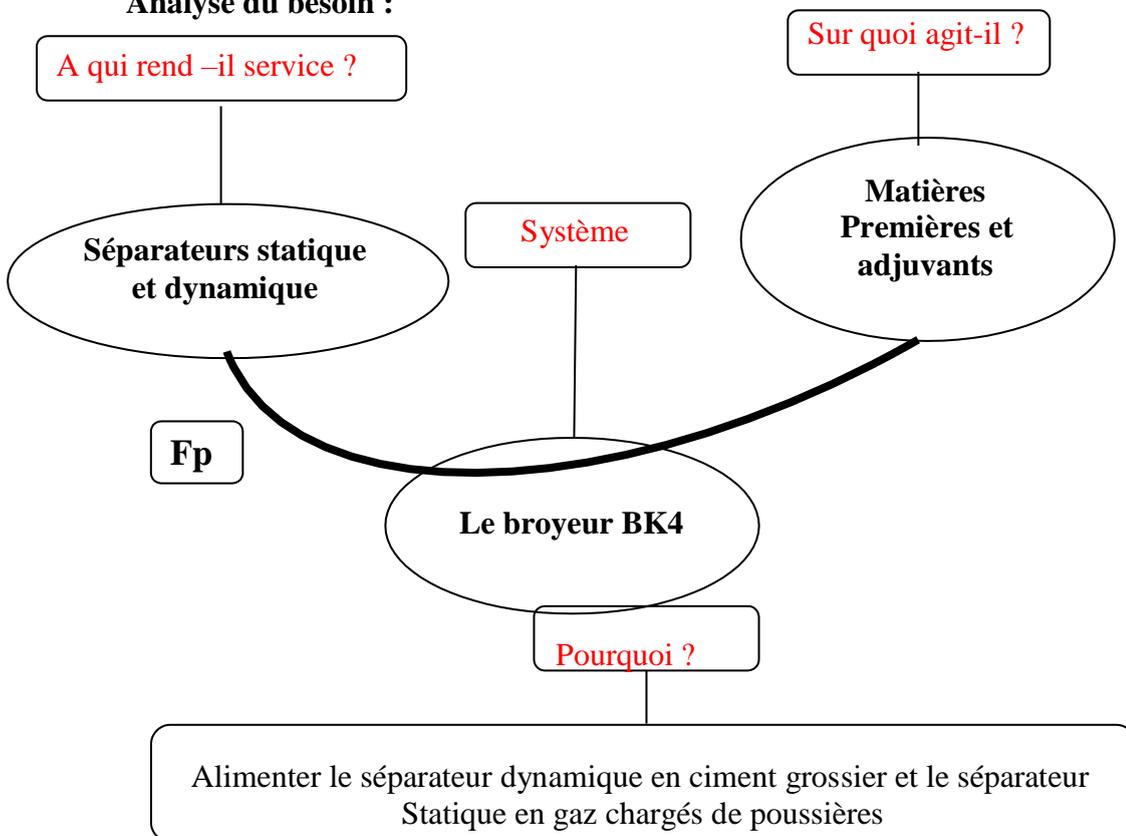


Figure IV.19 : Analyse du besoin du broyeur

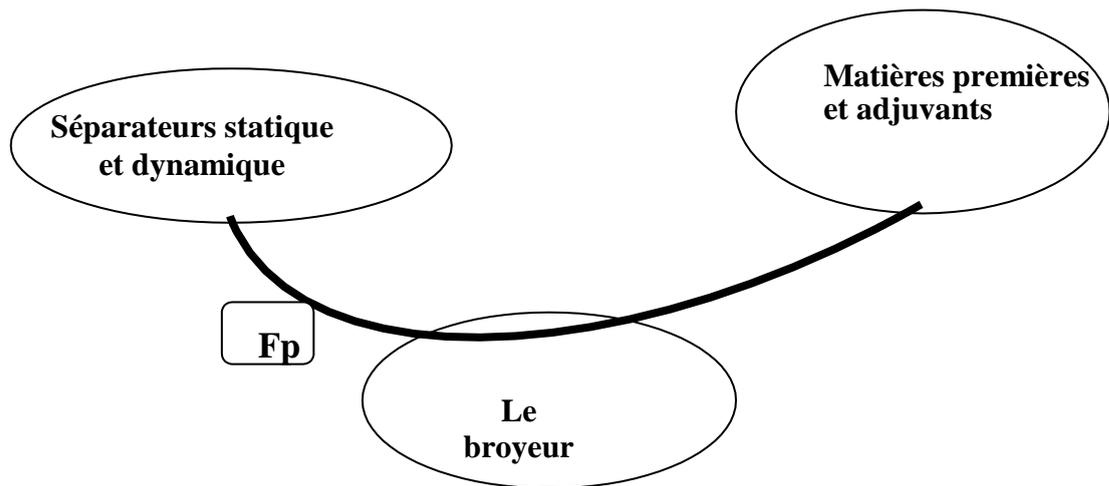


Figure IV.20 : Diagramme de bête à cornes

Fp : broyer les matières premières à savoir le calcaire, le clinker et les cendres avec addition du gypse et d’autres ajouts pour donner un ciment aux propriétés hydrauliques actives, et alimenter le séparateur statique en gaz chargé de particules de ciment et le séparateur dynamique en ciment grossier.

Le diagramme de Pieuvre permet la détermination des fonctions contraintes pour identifier les autres milieux extérieurs et tracer la relation simple qui les lie au système étudié.

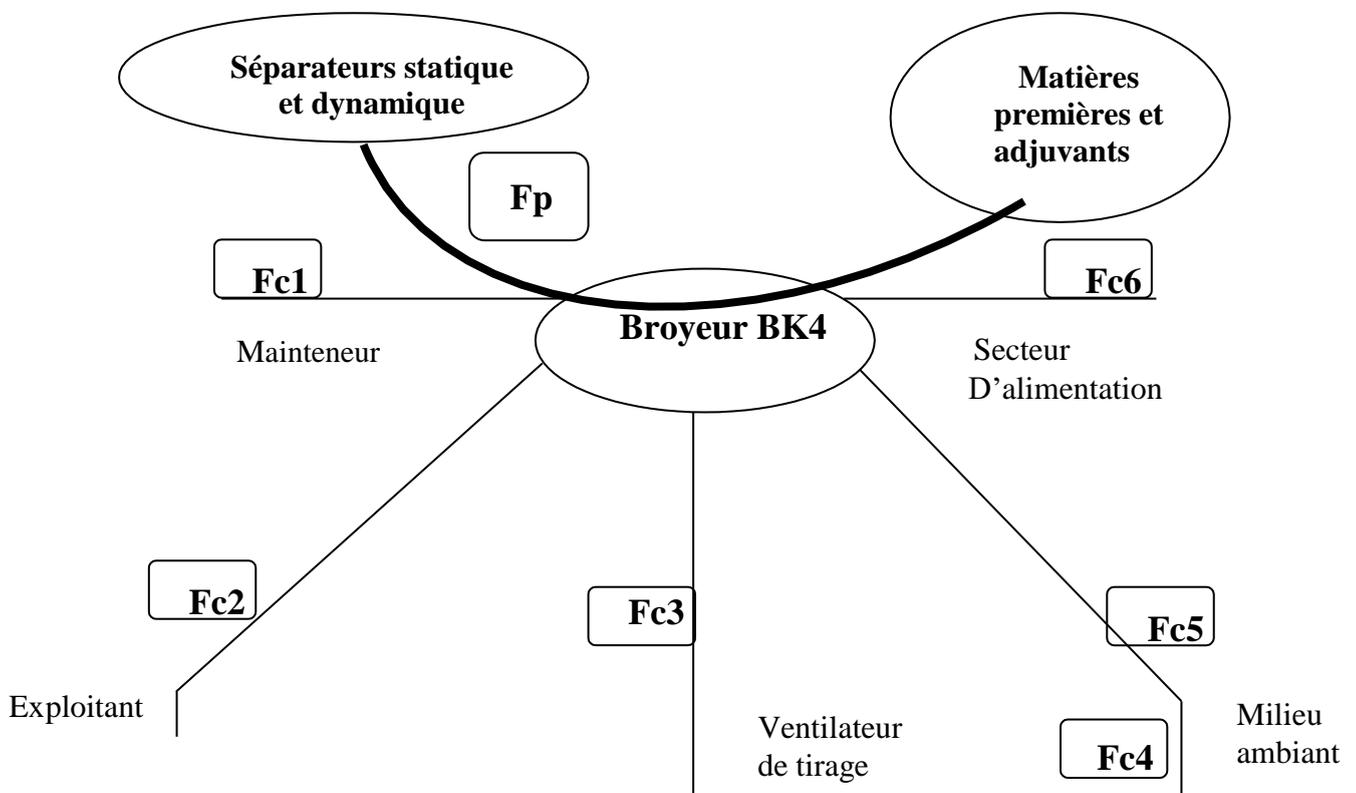


Figure IV.21 : Diagramme de la pieuvre du broyeur

Les différentes fonctions contraintes sont :

Fc1 : Faciliter au **mainteneur** la manœuvre en cas d'arrêt.

Fc2 : Contrôler et utiliser le broyeur par l'exploitant dans les conditions idéales de marche.

Fc3 : ~~assurer~~ le refroidissement du broyeur par un débit d'air atmosphérique du ventilateur de tirage.

Fc4 : Résister à la corrosion et à l'agressivité du **milieu ambiant** (milieu salin)

Fc5 : Ne pas polluer le **milieu ambiant**

Fc6 : Alimentation du motoréducteur du broyeur par le secteur.

5.3.4 Analyse interne

Après une entrevue avec les chefs de fabrication, de maintenance et de sécurité. On a jugé que notre analyse doit porter principalement sur le corps du broyeur, puisque c'est la pièce maîtresse lors du processus de broyage du ciment, pièces où il existe le plus grands de défaillance et qui a le plus grand impact sur la qualité du ciment et sur le débit de l'atelier.

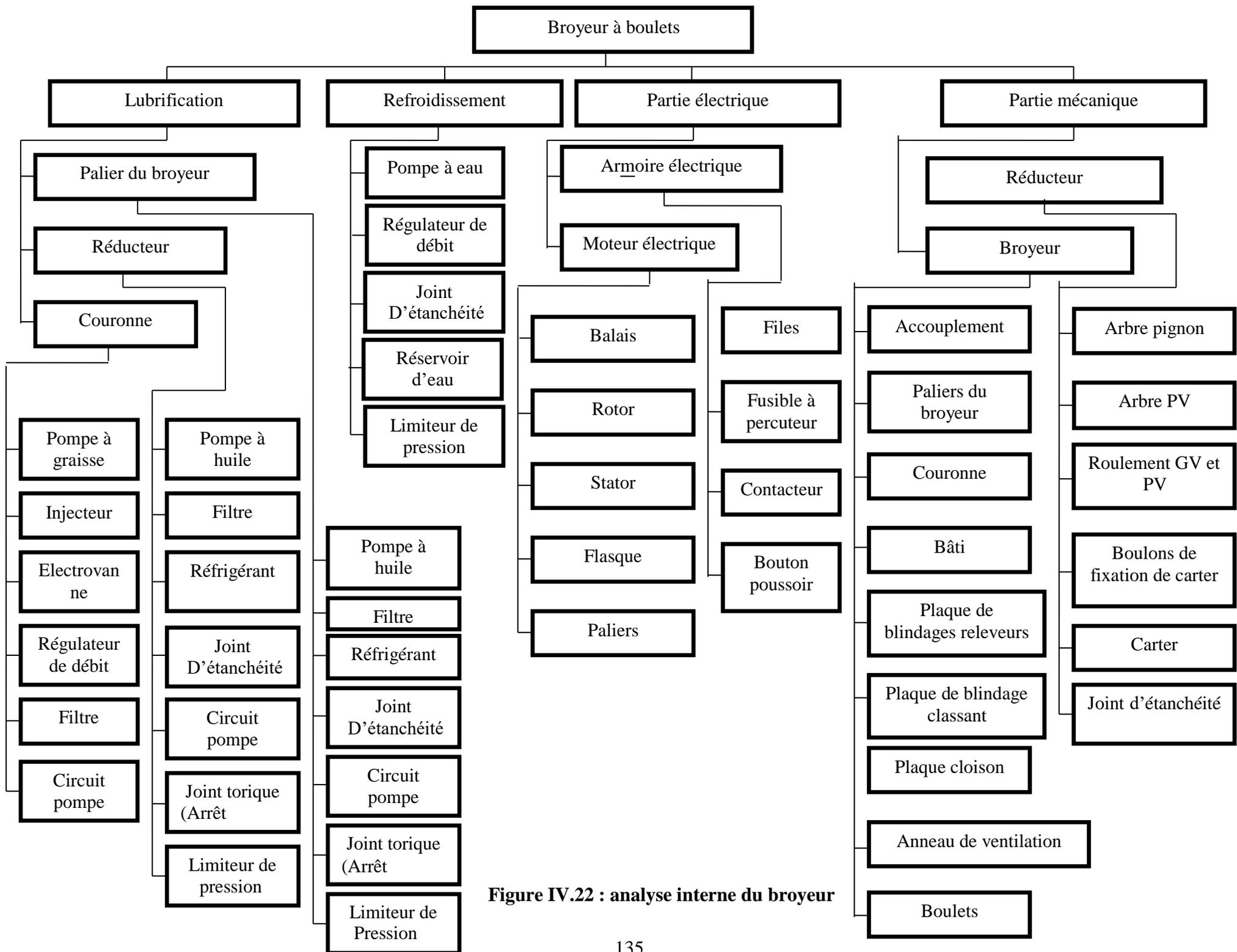


Figure IV.22 : analyse interne du broyeur

Tableau IV. 18: grille de l'AMDEC du broyeur

Système : Broyeur à boulets										
L'élément	fonction	Mode de défaillance	cause	effet	détection	Criticité				Action à engager
						F	G	D	C	
Accouplement grande vitesse	Transmettre la puissance au réducteur	Défaillance de système d'accouplement	-Desserrage des vis d'assemblage -Surcharge -Fatigue -Désalignement	-Mauvaise transmission -Usure des paliers -Usure des dents d'engrenage -Dégradation de fonctionnement de réducteur	Possible	2	3	2	12	-Réalignement -Serrage de système de fixation -Changement d'accouplement
Accouplement petite vitesse	Transmettre la puissance à la couronne	Défaillance de système d'accouplement	-Desserrage des vis d'assemblage -Surcharge -Fatigue -Désalignement	-Mauvaise transmission -Usure des paliers -Usure des dents d'engrenage -Dégradation de fonctionnement de réducteur	possible	2	2	2	8	-Réalignement -Serrage de système de fixation -Changement d'accouplement
Palier du broyeur porteur 1 et 2	Guider en rotation	-Usure	-Mauvais lubrification	-Echauffement -Vibration	Possible	2	3	2	12	-Surveillance périodique
Couronne	Transmission de puissance	Dent cassée	-Surcharge	-Vibration	possible	1	2	2	4	-Réparation des dents cassées
		Echauffement	Manque de graisse	-Délation -Vibration	Visuel	2	1	1	4	-Surveillance périodique

		Piqûre ou pitting	Dégradation de la graisse	trous plus ou moins profonds qui affectent toutes les dents	Impossible	1	2	3	6	Control périodique
Plaques de blindage releveurs	Assurer le broyage avec les boulets	-Usure des redents -desserrage des boulons de fixation	Influence de la matière et des boulets	Faible broyage	Impossible	3	3	4	36	-Surveillance périodique -Soudage ou changement des plaques fissurées
Plaques de blindage classant	Assurer le broyage avec les boulets	-Usure -Desserrage des boulons de fixation -Fissuration	Influence de la matière et des boulets	Faible broyage	Impossible	2	3	4	24	-Surveillance périodique -Soudage ou changement des plaques fissurées
Plaques cloison	Grille pour paroi de décharger	-Fermeture des lumières des plaque -Usure	Influence de la matière et des boulets	Faible aspiration de ciment	Impossible	3	3	4	36	Réparation des rainures
Anneau de ventilation	Assurer la ventilation Du broyeur	-Usure -Déformation des grilles	Influence de la matière et des boulets	Aspiration des grandes particules Passage de boulets	Impossible	2	2	4	16	Changement de grillage de l'anneau
Boulets	Broyage de la matière	Usure	Influence de la matière et des plaques	Faible broyage	Impossible	2	3	4	24	Changement des boulets
Boulons de fixation des plaques	Fixation	Fissuration de taraudage	-Chocs -Surcharge	Libérer les plaques	Impossible	3	2	2	12	-Changements des boulons
Bâti de broyeur	Réforme et protège l'ensemble	Usure par abrasion	Influence de l'environnement	Dégradation du bâti	visuel	1	2	1	2	

Après les réunions avec les chefs de fabrication, de maintenance et de procédé. On a choisi la valeur 12 comme seuil de criticité. Les éléments dont la criticité dépasse 12 sont regroupés par ordre décroissant dans le tableau. C'est sur ces éléments qu'il faut agir en priorité en engageant des actions correctives appropriées.

Tableau IV. 19: classement des éléments par criticité

Elément	Criticité	Actions correctives à engager
Plaques de blindages releveurs	36	Optimiser le taux de remplissage et la répartition des boulets. Revoir la qualité des éléments.
Plaques cloison	36	
Boulets	24	
Plaques de blindage classant	24	
Anneau de ventilation	16	
Accouplement grande vitesse	12	Surveillance particulière Maintenance préventive conditionnelle
Accouplement petite vitesse	12	
Paliers du broyeur porteurs 1 et 2	12	
Boulons de fixation des plaques	12	
Accouplement petite vitesse couronne	8 6	Amélioration des performances des éléments Maintenance préventive systématique
Bâti de broyeur	2	Aucune modification

Pour l'amélioration de la disponibilité de ce système de Broyage, il faut concentrer les actions de maintenance sur les équipements ayant une criticité $C \geq 12$ en appliquant les

Actions suivantes :

- Surveillance périodique
- Maintenance systématique ou conditionnelle

5.3.5 Les plans d'actions :

Plans d'actions spécifiques

- Plaques de blindage Releveurs et classant :

1-Contrôle préventif conditionnel

2-Suivi du profil des releveurs : tracé de l'évolution de l'usure,

3- contrôle systématique :

4- Contrôle visuel chaque 2 mois.

- -Plaques cloison :

1- Réparation des rainures

2- Contrôle visuel chaque 2 mois.

- -anneau de ventilation :

1- Changement de grillage de l'anneau.

2- Contrôle visuel chaque 2 mois.

- -boulets :

1- Changement des boulets.

2-Réalisation de teste axiale chaque arrêt du broyeur.

3- Contrôle visuel chaque 2 mois.

D'après les résultats obtenus, nous avons bien déterminé les risques de dysfonctionnement de ce système de Broyage en mettant en évidence les points critiques pour proposer des actions de maintenance afin de réduire leur criticité.

On déduit que la majorité des problèmes rencontrés dans ce système sont dus à l'usure.

Pour éviter ce genre de problèmes il faut faire un contrôle d'usure systématique pour s'assurer qu'il ne se précipitera jamais ces défaillances qui gêne vraiment le fonctionnement normal de ce système et engendre des longs arrêts de réparation et de nettoyage.

A la fin de cette étude, on peut dégager avec les recommandations suivantes :

-Il faut respecter les instructions de la maintenance systématique telles que les

remplacements des pièces défectueux selon les périodicités recommandées par le constructeur.

- Etablir des fichiers historiques.
- Refaire l'étude AMDEC systématiquement.
- Former le personnel de service maintenance à l'AMDEC.
- Tenir un stock de sécurité des pièces de rechange de 1^{ère} nécessité

6. Inspection interne du broyeur

6.1. Introduction

D'après l'analyse AMDEC du broyeur, nous avons pu distinguer que les éléments dont le seuil de criticité est intolérable et qui ont eu une influence majeure sur la chute du débit sont les éléments internes du broyeur, à savoir le blindage, la cloison intermédiaire et les charges broyantes. Par conséquent on se propose de réaliser une inspection interne du broyeur, étape importante puisqu'elle donne une évaluation qualitative du fonctionnement du broyeur.

Lors de cette inspection, il faut :

- Prendre des échantillons de la matière.
- Observer les éléments internes du broyeur : blindage, boulets, grilles de ventilation et cloisons (intermédiaire et de sortie) pour chaque compartiment.

Cette opération se fait lors du crash-stop de l'atelier de broyage (tous les équipements, ventilation et alimentation, sont stoppés d'un coup pour conserver les mêmes conditions qui existaient avant l'arrêt).

6.2. Méthodes d'analyses de la matière

6.2.1 Niveaux de matière

Il faut évaluer le niveau de matière de chaque compartiment.

Dans le compartiment 1, généralement court et équipé de blindage releveur, le niveau de matière par rapport aux boulets doit être au même niveau.

Dans les compartiments 2, plus longs et équipé de blindage auto classant, la matière doit être localisée :

- 3 à 4cm au-dessus des boulets au début de la chambre
- Au même niveau que la charge au centre de la chambre.
- 3 à 4cm au-dessous de la charge à la fin de la chambre.

On doit aussi vérifier s'il y a une accumulation de grains non broyés au niveau de la cloison de sortie du compartiment et essayer de la quantifier

6.2.2 Échantillonnage

L'objectif de cet échantillonnage est de connaître la distribution des boulets tout au long du broyeur et de caractériser l'évolution des dimensions des particules.

Comment procède-t-on à un échantillonnage ?

On prend des échantillons de la matière tous les 0,5m pour la première chambre et tous les 1m pour la deuxième en creusant avec une cuillère de prélèvement une tranchée transversale de 10 à 15 cm de profondeur, sur un demi-diamètre côté releveur du broyeur afin de prendre de la matière dans la charge de boulets (la couche superficielle risque d'être polluée par le dépôt de matière consécutif à l'arrêt d'urgence).

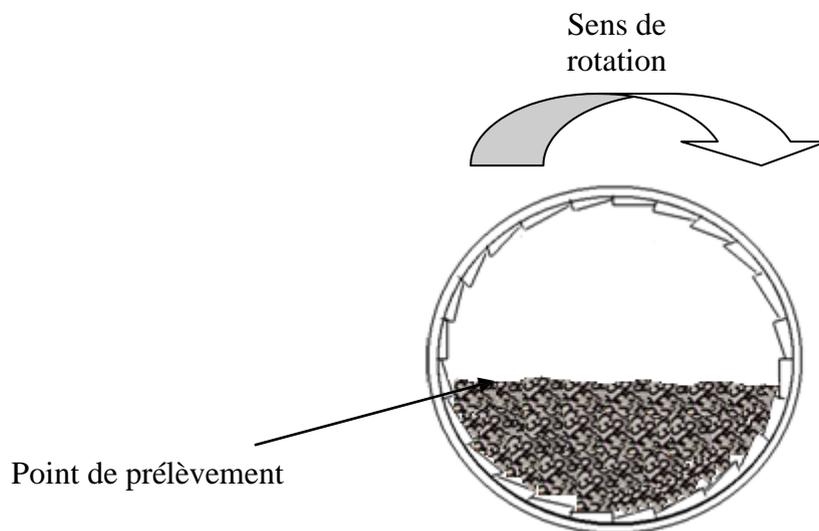


Figure IV.23 : choix de points de prélèvements

Dans la compartiment 2, il est conseillé d'utiliser un tamis (de 10 à 15 mm) pour séparer les boulets de la matière.

Après analyse de la granulométrie par échantillon (**annexe 1**), on tracera une courbe par compartiment du pourcentage de refus en fonction de la longueur du compartiment. Cette analyse permet de voir l'évolution de la granulométrie matière dans chaque compartiment et d'ajuster la taille des boulets.

Les mailles de tamisage dépendent du matériel disponible.

On peut donner comme base :

Compartiments 1 et 2	25mm
	10 mm
	5 mm
	2,5 mm
	1 mm
	500 µm
	315 µm
	200 µm
	160 µm
	125 µm
	100 µm
	90 µm
	80 µm
	64 µm
63 µm	

Tableau IV. 20 : mailles des tamis disponibles

Après, on trace une courbe représentant le pourcentage des rejets cumulés pour chaque tamis en fonction du point de prélèvement (distance).

7. Vérification des éléments internes du broyeur

7.1 Dimensions caractéristiques

Il faut mesurer les dimensions effectives de chaque chambre : le diamètre et la longueur utile. Le diamètre utile prend en compte un redent sur deux.

Mesurer la vitesse de rotation V du broyeur en chronométrant le temps nécessaire à la virole pour effectuer un nombre de tours déterminé, et vérifier le rapport V/V_c avec V_c la vitesse critique en tr/min (voir annexe 6).

7.2 Blindages

▪ Pour le compartiment 1 :

Le compartiment 1 travaille par concassage, d'où la nécessité de relever la charge broyante par l'intermédiaire de blindages releveurs.

D'un point de vue processus, le redent ne doit pas être usé à plus de 60 % du redent initial pour garder une fonction de relevage.

En pratique, le redent initial est généralement de 70 mm. On doit mesurer les

redents (différence de hauteur entre 2 plaques consécutives sur un même rang) et les comparer avec les redents initiaux. Il faut vérifier qu'ils ne deviennent pas inférieurs à 30 mm car cela affecte les performances du broyeur.

▪ **Pour le compartiment 2 :**

Le compartiment 2 travaille par attrition (broyage par frottement boulets/matière), les blindages sont généralement de type classant.

Le redent initial est généralement de l'ordre de 12 mm, et compte tenu des boulets de faible dimension (60 mm maxi) dans ce compartiment, l'usure n'évolue que très lentement. Mais il faut vérifier la présence éventuelle d'enrobage des blindages par la matière

7.3 Cloisons et fonds d'entrée et de sortie

Une première face équipée de lumières, une face arrière équipée de plaques aveugles et entre les 2 des releveurs. Il faut :

- Vérifier si les grilles ne sont pas obstruées par la matière.
- Observer l'anneau de ventilation et estimer sa perméabilité.
- Noter le nombre de secteurs et les décalages éventuels : un décalage entre secteurs va générer un espace plus ou moins important assimilable à une lumière. Si cette lumière est importante, il y a risque de passage de grains grossiers vers le compartiment 2.

7.4 La charge broyante

Il faut vérifier l'état des boulets (usure : vérifier la forme des boulets et trouver le diamètre du plus gros et du plus petit boulet visible, la présence éventuelle d'enrobage des boulets par de la matière ...).

8. Résultats et interprétations

8.1 Niveau de matière/boulets

Il faut évaluer le niveau de la matière dans chaque compartiment et d'après le crash-stop qu'on a fait, j'ai constaté :

- **Pour le compartiment 1 :**

Le niveau de matière est au même niveau des boulets, donc le niveau de matière est bon, mais la plupart des boulets sont déformés.

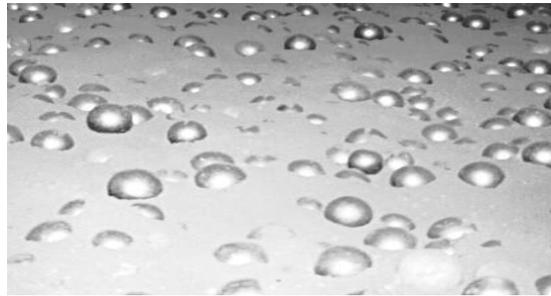


Figure IV.24. Niveau matière/boulets pour le compartiment 1

- **Pour le compartiment 2 :** le niveau de matière est au-dessus du niveau de la charge normale de 2cm.

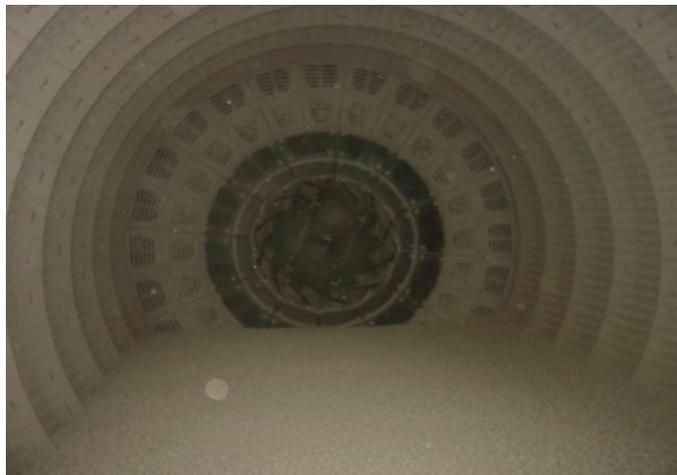


Figure IV.25. Niveau matière/boulets pour compartiment 2

8.2. Etats des éléments internes du broyeur

- **Mesure des caractéristiques :**

Vitesse de rotation tr/min	Compartiment 1		Compartiment 2		Vitesse critique tr/min
	Longueur utile	Diamètre utile	Longueur utile	Diamètre utile	
14,5	4 m	4,76 m	9,25 m	4,76 m	19,38

Tableau IV. 21: Caractéristiques du broyeur

Le rapport $V/V_c=74,78\%$ est dans la fourchette recommandée.

- **Blindages :**

- ❖ **Compartiment 1**

On a constaté que, l'état des blindages est bon sauf pour les deux premières rangées puisque la matière dépasse l'entrée.



Figure IV.26 : État de blindages pour le compartiment 1

❖ Pour compartiment 2

Le redent initial est de l'ordre de 12 cm, et compte tenu des boulets de faible dimension (60 mm maxi) dans ce compartiment, l'usure n'évolue que très lentement.



Figure IV.27 : état de blindages compartiment 2

Il se produit plutôt une usure apparaissant sous forme de stries perpendiculaires à l'axe du compartiment.

▪ Cloisons :

Cloison intermédiaire : la cloison intermédiaire est de type polysius avec des releveurs inclinés réglables, en inspectant la cloison intermédiaire du côté de C1, nous avons détecté plusieurs lumières matées, un colmatage estimé à environ 20% dans le premier secteur et 5% dans le second et 0% dans le troisième secteur.



Figure IV.28 : Matage des lumières

On a constaté aussi que plusieurs boulons de fixation sont cassés ce qui induit que les releveurs concernés percutent leur voisin à chaque rotation du broyeur.

D'autre part, l'anneau de ventilation de la cloison intermédiaire (diamètre 1,76m) est une grille à barreaux offrant une bonne perméabilité, ce qui assure une bonne ventilation du broyeur et garantir le passage de la matière au compartiment C2.

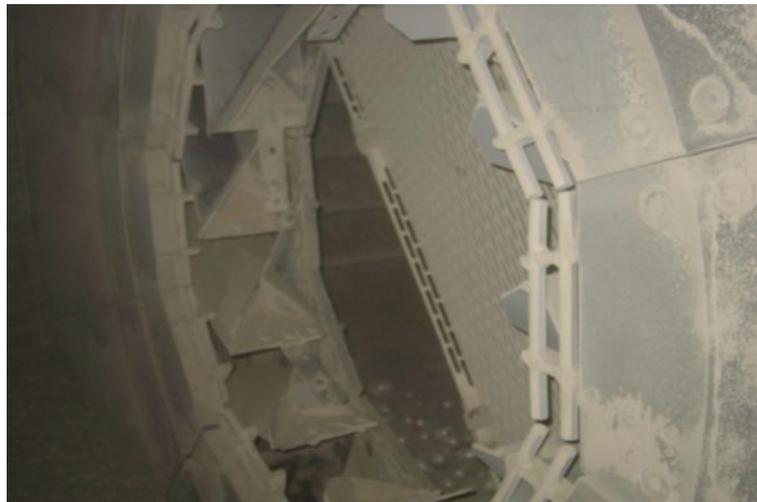


Figure IV.29 : releveurs de la cloison intermédiaire

- Cloison de sortie : la cloison de sortie, avait subi à son tour un colmatage estimé à environ 100% dans le premier secteur, 50% dans le second et 0% dans le troisième. Il y a aussi la présence des plaques de cloison cassées. L'anneau de ventilation de la cloison de sortie est en bonne état.



Figure IV.30. Colmatage et plaques cassées de la cloison de sortie

8.3 Analyse des résultats des prélèvements de matière

Pour la chambre 1

❖ Prélèvement de matière

Les résultats des prélèvements de matière lors de crash stop du l'atelier de broyage pour le compartiment 1 sont présentés dans le tableau suivant :

Taille de maille (µm)	C1-1	C1-2	C1-3	C1-4	C1-5	C1-6	C1-7	C1-8	C1-9
63	69,32	65,98	69,42	66,57	67,1	62,72	62,6	60,93	64,57
64	68,61	65,27	68,7	65,85	66,42	62,06	61,96	60,25	63,88
80	57,18	54,01	57,21	54,48	55,44	51,58	51,81	49,6	52,98
90	50,3	47,3	50,29	47,69	48,84	45,34	45,77	43,3	46,47
100	43,86	41,05	43,81	41,37	42,65	39,51	40,12	37,46	40,4
125	30,16	27,88	30,04	28,02	29,44	27,12	28,04	25,16	27,53
160	16,68	15,1	16,54	15,09	16,39	14,93	15,98	13,29	14,92
200	44,9	41,75	53,9	43,4	49,1	43,2	41,8	45,75	42,9
315	39,4	34,65	49,25	37,7	43,7	36,6	35,1	35,8	35,15
500	33,3	26,4	42,95	29,6	34,9	26,3	24,5	24,35	22,8
630	31,05	22,9	40,75	26,8	31,65	23,35	20,05	19,6	18,9
2500	22,35	9,65	30,5	15,25	18,05	10,2	7,45	5,4	6,6
5000	17,6	4,55	23,4	9,15	12	5,95	2,95	2,2	2,75
10000	9,6	1,5	15,4	2,65	4,7	2,7	0,9	1	1,2
25000	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau IV. 22 : résultats de l'analyse par tamisage pour C1

Le graphe d'évolution de la granulométrie dans le compartiment 1

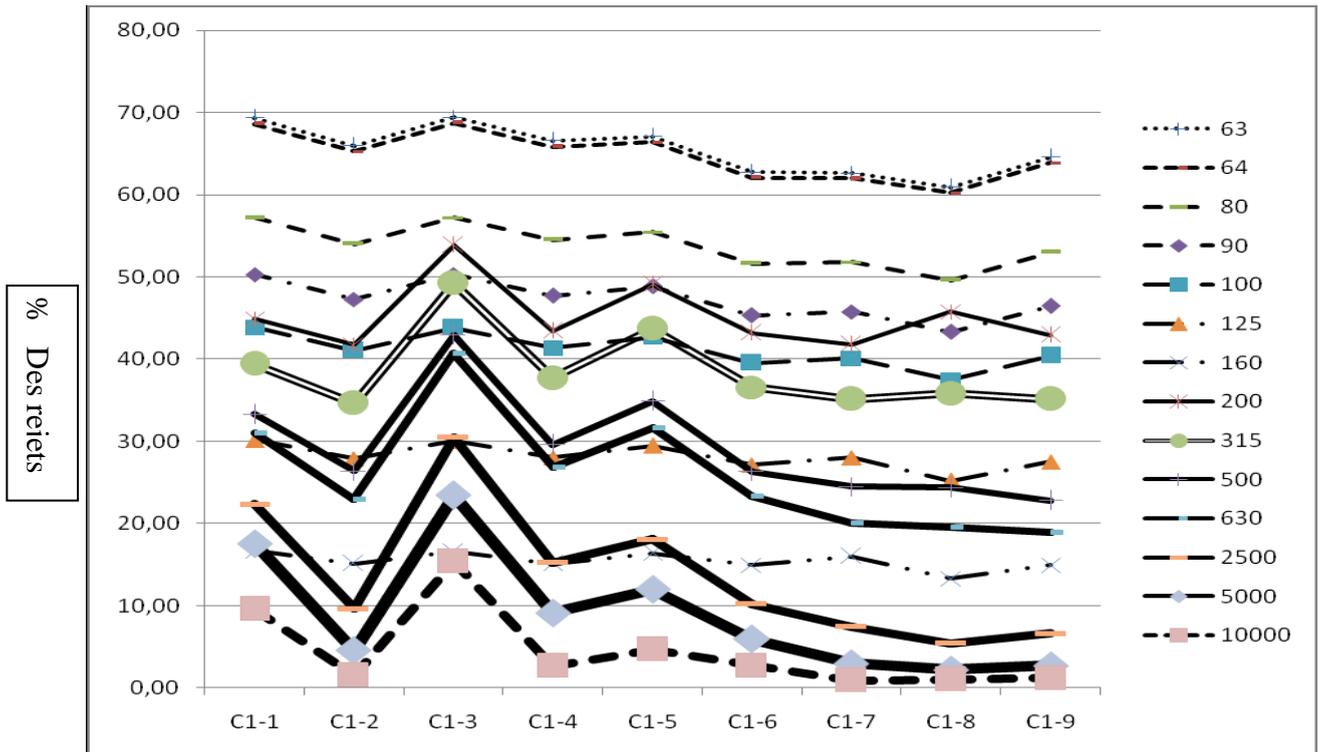


Figure IV.31 : courbe de l'évolution de la granulométrie dans le compartiment 1

Cette courbe montre qu'il y a une mauvaise répartition de la charge broyante dans le compartiment 1. Car la courbe doit être décroissante.

Le point C1-3 est le point où il y a le pourcentage le plus élevé des rejets cumulés pour chaque tamis, on pense que cela est dû au fait que la matière entre avec un débit élevé et la ventilation est forte, et donc la matière dépasse l'entrée du broyeur et arrive jusqu'à C1-3, cela est prouvé aussi par le fait que les blindages à l'entrée du broyeur (deux rangés de blindage révélateur) sont complètement usés.

D'autre part, la charge des boulets dans le compartiment 1 n'assurent pas son travail de concassage à cause du changement de la qualité du clinker utilisé qui est très poussiéreux ce qui fait que la granulométrie du clinker est fine et la répartition de la charge broyante est mal adaptée pour ce clinker.



Clinker granulé (produit par la bauxite) Clinker poussiéreux (produit par le machfer+ CV)

Figure IV.32 : comparaison entre les types de clinker

❖ **La charge broyante**

La répartition actuelle des boulets dans la première chambre est comme suit :

Répartition actuelle des boulets en % massique

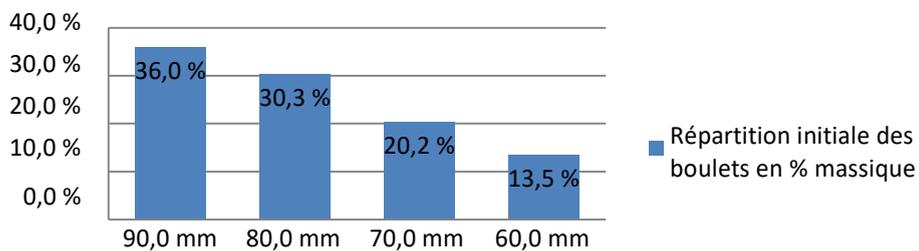


Figure IV.33 : répartition actuelle des boulets dans le compartiment 1
Ainsi le taux de remplissage théorique actuel (**annexe 4**) est :

$$F = \frac{S}{A} \cdot \text{en \%}$$

A : surface libre.

S : superficie de la charge

$$F = \frac{\frac{\text{Poids de la charge}}{\text{Densité apparente} \cdot \text{longueur de compartiment}}}{\frac{3.14 \cdot \text{Diamètre interne}^2}{4}} \cdot 100$$

$$F = \frac{\frac{89T}{4.5T/m^3 \cdot 4m}}{\frac{3.14 \cdot 4.76^2}{4}} \cdot 100 = 27.8\%$$

❖ Taux de remplissage mesuré

La mesure de la hauteur libre qui correspond à l'espace vide dans le compartiment 1 a donné les résultats suivants :

C1	
Point de mesure	Hauteur libre(m)
1	3,42
2	3,47
3	3,42
4	3,47
5	3,41
6	3,47
moyenne	3,44

Tableau IV. 23 : mesure de la hauteur libre pour le compartiment 1

Le diamètre utile de la chambre 1 est 4,76m donc $H/D = 0,722$, et d'après (annexe 4) On a $F_{mesurée} = 22,53\%$, ce qui correspond à environ 21,1% de remplissage réel en boulets.

On remarque un gros écart entre le taux de remplissage mesuré et théorique ce qui explique la perte de 6% de la charge au niveau du compartiment 1 par rapport à la charge initiale cela est prouvé par la présence de plusieurs boulets déformés et usés.

Pour le compartiment 2

Les résultats des prélèvements de matière dans le compartiment 2 sont :

Taille de maille (μm)	C2-1	C2-2	C2-3	C2-4	C2-5	C2-6	C2-7	C2-8	C2-9
63	52,66	57,69	57,21	53,25	50,51	49,03	47,34	47,54	49,64
64	52,09	57,07	56,6	52,69	49,91	48,43	46,75	46,96	49,06
80	43,43	47,29	47	44,02	40,7	39,38	37,82	38,2	40,27
90	38,4	41,5	41,26	38,97	35,45	34,29	32,81	33,31	35,3
100	33,74	36,1	35,87	34,29	30,67	29,68	28,27	28,89	30,78
125	23,79	24,65	24,33	24,27	20,77	20,19	18,98	19,84	21,4
160	13,66	13,42	12,91	14,1	11,27	11,12	10,19	11,17	12,25
200	23,8	41,7	27,6	13,15	12,5	10,25	8,15	9,05	10,4
315	15,95	28,95	17,6	6,75	10,4	7,85	4,5	4,8	6,1
500	6,5	13,95	6,95	2,8	2,3	2,7	1,95	2,1	2,65
630	4,85	10,55	5,25	2,05	1,6	2,15	1,25	1,65	1,85
2500	0,95	2,2	0,5	0,5	0,55	0,75	0,05	0,45	0,3
5000	0,4	0,8	0	0,2	0,4	0,3	0	0	0
10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25000	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau IV. 24: résultats de l'analyse par tamisage pour le compartiment 2

L'évolution de la granulométrie dans le compartiment 1 est présentée dans le graphe suivant :

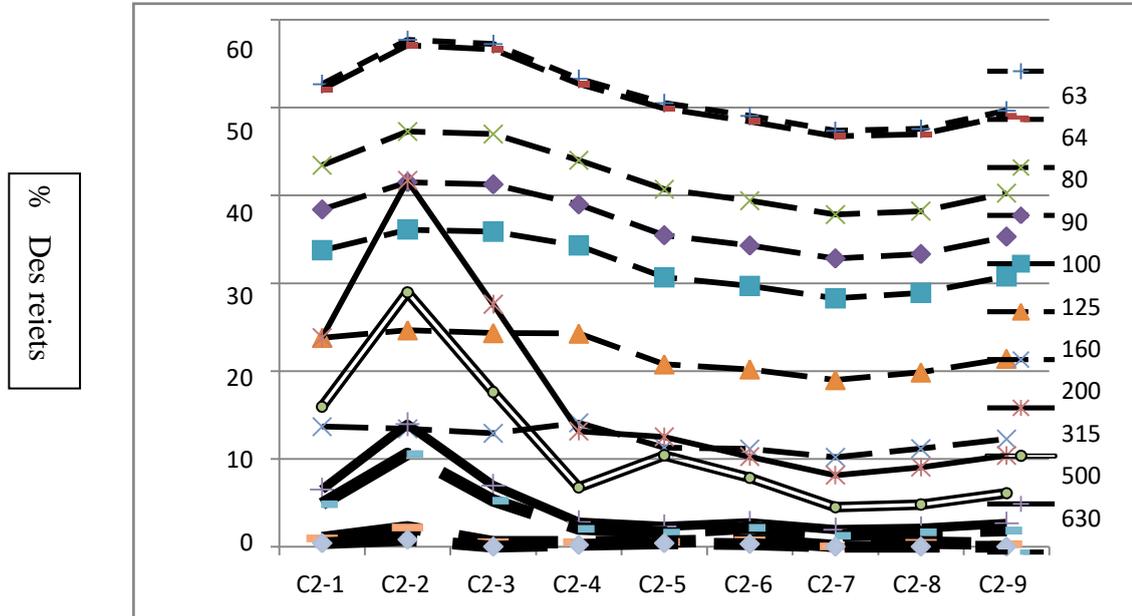


Figure IV.34 : courbe de l'évolution de la granulométrie dans le compartiment 2

On constate qu'il n'y a pas l'évolution de la granulométrie dans la chambre 2, cela est dû au mauvais fonctionnement de la chambre 1 qui n'assure pas le concassage de la matière par le mode cataracte. Et par suite la chambre 2 ne peut pas faire l'attrition de la matière puisqu'elle contient des boulets petits (entre Ø50mm et 17mm).

❖ La charge broyante :

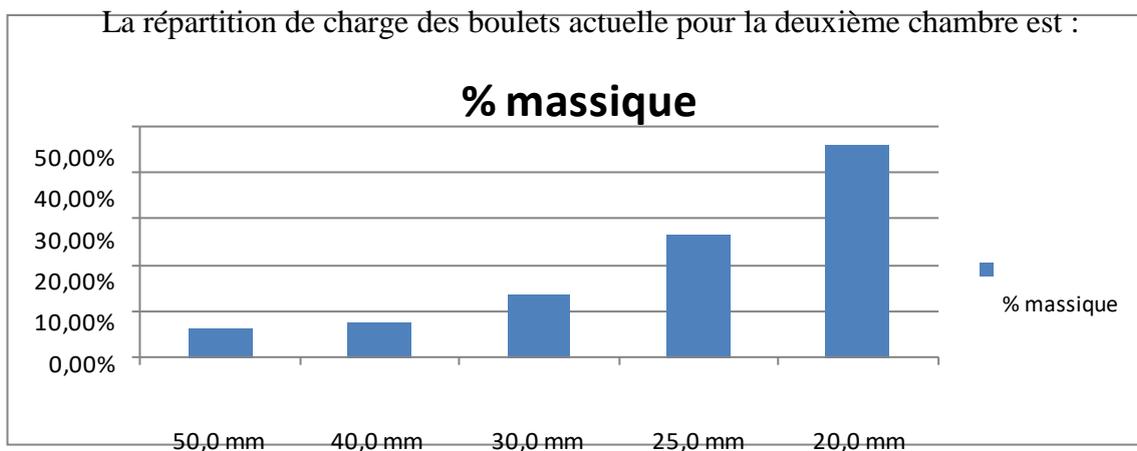


Figure IV.35 : répartition actuelle des boulets dans le compartiment 2

Ainsi le taux de remplissage théorique actuel est :

$$F = \frac{S}{A} \cdot 100 \%$$

$$F = \frac{\frac{\text{Poids de la charge}}{\text{Densité apparente} \cdot \text{longueur de compartiment}}}{\frac{3.14 \cdot \text{Diamètre interne}^2}{4}} \cdot 100$$

$$F = \frac{\frac{190T}{4.5T/m^3 \cdot 4m}}{\frac{3.14 \cdot 4.76^2}{4}} \cdot 100 = 24.6\%$$

❖ Le taux de remplissage mesuré :

La mesure de la hauteur libre qui correspond à l'espace vide dans la chambre 1 a donné les résultats suivants :

C2	
Point de mesure	Hauteur libre(m)
1	3,32
2	3,32
3	3,3
4	3,48
5	3,48
6	3,44
moyenne	3,39

Tableau IV. 25 : mesure de la hauteur libre pour le compartiment 2

Le diamètre utile de la chambre 2 est $D=4,76$ donc $H/D=0,712$, et d'après la figure on a $F_{\text{mesurée}}=23,82\%$, ce qui correspond à environ 23,34% de remplissage réel en boulets.

8.4 Proposition de la charge broyante

Généralement, la granulométrie du clinker à l'entrée du broyeur est fine, et cela depuis le remplacement de la bauxite par le machefer plus les cendres volantes pour la fabrication du clinker ce qui fait que la répartition des boulets est inadaptée pour cette granulométrie, le nombre des boulets de grosses dimensions est trop grand.

On a proposé une nouvelle répartition plus adaptée à l'état du clinker et qui corrigera l'évolution de la granulométrie de la matière tout au long du broyeur en se basant sur l'analyse granulométrique par tamisage de deux échantillons de clinker l'un fabriqué

par le bauxite et l'autre fabriqué avec le machefer.

	clinker poussiéreux		clinker granulé	
Masse initiale (g)	7352		8250	
Maille	%rejets cumulé clinker poussiéreux	%passant cumulé	%rejets cumulé clinker granulé	%passant cumulé
>50mm	0	100	0	100
>37,5mm	0	100	7,67	92,33
>25mm	4,52	95,48	19,55	80,45
>10mm	16,8	83,2	52,95	47,05
>5mm	28,91	71,09	74,85	25,15
>3,15mm	38,03	61,97	84,99	15,01
>2,5mm	41,98	58,02	87,89	12,11
>2mm	46,08	53,92	90,22	9,78
>1mm	59,61	40,39	93,75	6,25

Tableau IV. 26: résultats d'analyse par tamisage de types de clinker produits

Le D80 est la dimension de la maille pour laquelle on a 80 % de passant. Les valeurs obtenues sur ces prélèvements donnent un D80 de 5 mm sur le clinker poussiéreux et un D80 de 17 mm.

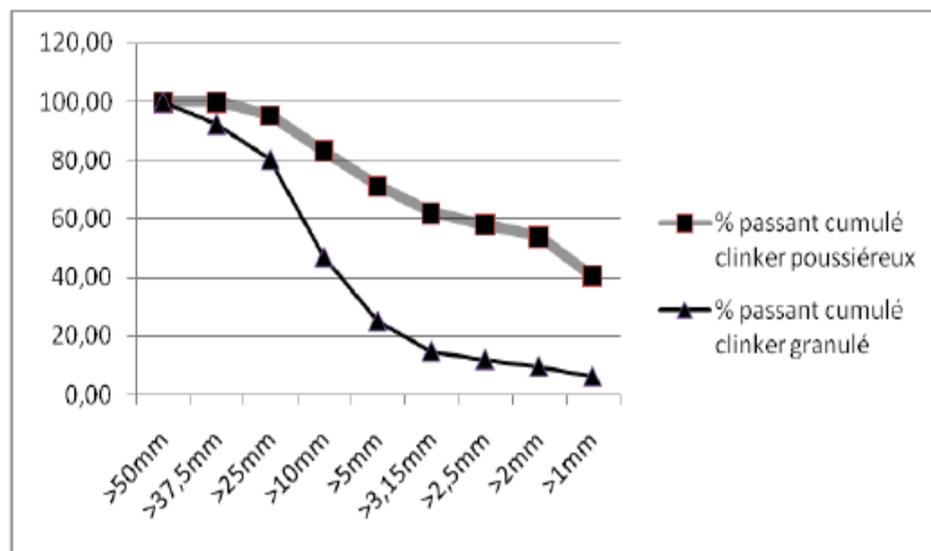


Figure IV.36 : courbe de la granulométrie du clinker produit

Pour la chambre 1, on a proposé d'enlever 5t de la charge en 90mm et 5t de 80mm et en ajoutant 5 t de boulets de 50 mm (boulets de transition).

Tableau IV. 27 : la répartition proposée des boulets pour le compartiment 1

Ø BOULETS	TONNAGE	% massique
90,0 mm	27,00 t	26,20%
80,0 mm	22,00 t	32,10%
70,0 mm	18,00 t	21,40%
60,0 mm	12,00 t	14,30%
50,0 mm	5,00 t	6,00%
	84,00 t	

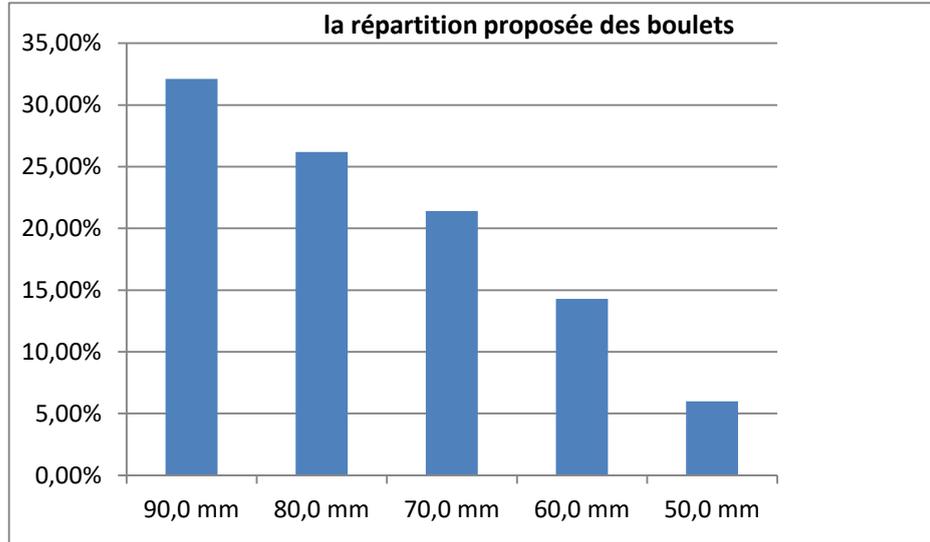


Figure IV.37 : la répartition proposée des boulets en % massique

Pour le compartiment 2 on a proposé d'ajouter 5t des boulets de faible diamètre de 20mm ce qui va augmenter le taux de remplissage de C2 de 24,6% à 25,2% dont le but de supporter l'augmentation de la charge en fine.

Le compartiment a une distribution correcte mais peut être augmentée sans trop toucher à la zone de transition (boulets de 40 et 50 mm) actuellement suffisante, alors on a proposé d'ajouter 5t des boulets de faible diamètre de 20mm ce qui va augmenter le taux de remplissage de C2 de 24,6% à 25,2% et cela dont le but de supporter l'augmentation de la charge en fine.

Il y a une mauvaise répartition dans les deux chambres, ce qui entraîne une surconsommation énergétique et un mauvais broyage.

Dans le compartiment 1, Les boulets et les blindages à l'entrée sont usés, ce qui réduit leur rendement, une solution mécanique sur le fond d'entrée du broyeur s'avère nécessaire pour remédier au problème de la matière qui dépasse l'entrée du broyeur.

La répartition qu'on a proposée semble convenir plus à la granulométrie du clinker.

9. Conclusion de l'étude de cas N°2

Il est à souligner que notre travail au niveau de la cimenterie avait pour objectif la réduction du prix de revient de la fabrication du ciment d'une part, d'autre part, d'optimiser les performances de la chaîne de fabrication tout en tenant compte des changements entrepris et de la qualité du ciment produit.

Nous précisons toutefois, que l'optimisation des performances de broyeur n'est qu'un repère dans la démarche de l'optimisation des performances de la cimenterie. Dans ce sens, et afin de conduire une démarche d'optimisation efficace, il est judicieux d'entreprendre la même approche au niveau de tout le processus de fabrication.

10. Conclusion du chapitre

La mise en place d'un plan de maintenance stratégique demeure une orientation d'une grande nécessité pour l'entreprise qui doit faire face de plus en plus aux différentes exigences du marché en général et de ces clients en particulier.

Par ailleurs, il est important de souligner que ce travail a représenté pour nous un double défi, d'une part, il nous a permis d'appréhender un sujet très important visant l'optimisation d'une chaîne de production. D'autre part, de proposer des solutions d'amélioration de la productivité pour les entreprises d'accueil, ces solutions vont permettre de réaliser un gain annuel très important.

Conclusion générale

L'amélioration et la maîtrise des outils de production sont donc devenues un enjeu capital pour la survie et la pérennité des entreprises. Ainsi, est-il devenu indispensable d'assurer la disponibilité des biens de production, leur fiabilité, et d'optimiser leurs conditions d'exploitation en vue d'une qualité optimale.

Un plan de maintenance préventif ne peut pas être parfait dès le départ. Il faut donc mettre en place des indicateurs techniques et financiers pour suivre ce plan en vue de son optimisation. Pour avoir un suivi efficace, en plus du retour d'informations données par les intervenants, les indicateurs de performance sont nécessaires. Afin de servir et visualiser l'adéquation entre le plan de maintenance et les conditions de production humaines et matérielles. Afin de suivre la disponibilité des équipements, et l'augmentation escomptée de la productivité.

La mise en place d'un plan de maintenance préventif permet de prévenir et de diminuer l'interruption des opérations de production et de maintenir l'équipement dans un très bon état et fonctionner efficacement tout en assurant la qualité du produit fini.

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés à l'intégration entre la fonction maintenance et la fonction production et optimisation de la maintenance préventive en se basant sur l'amélioration des modèles analytiques de la maintenance basée sur la fiabilité. La clé de notre étude consiste à explorer le lien entre la dégradation progressive du système de production et son impact sur la production.

En effet, notre contribution consiste à développer de nouvelles stratégies de maintenance en tenant compte de l'effet de la dégradation des équipements de production et de son impact économique sur l'entreprise.

Pour bien mener ces travaux de recherche, nous avons commencé ce mémoire par une étude approfondie de la littérature. Cette partie a fait l'objet d'un premier chapitre, dans lequel nous avons présenté plusieurs travaux réalisés concernant la fonction maintenance dans les

systèmes de production qui présente les différents types et politiques de la maintenance appliqués dans l'industrie, ainsi que les récents travaux, et les configurations des systèmes de production et leurs classifications, Cette revue concerne aussi l'historique du concept de la maintenance, sa motivation, son évolution ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'étude de la liaison entre les fonctions maintenance et production et l'intégration entre les deux les politiques, publiées dans la littérature les études portant sur la planification de la production de la maintenance. On a traité de l'interaction entre la maintenance et la production dans plusieurs catégories, à savoir : le coût des temps d'arrêt, la maintenance des opportunités.

Le troisième vise à dégager la politique de maintenance adéquate nous avons été intéressées, aux méthodes d'optimisation de la maintenance. Nous avons donné un intérêt particulier à l'amélioration de la méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur Fiabilité (MBF) qui permet de choisir et optimiser la maintenance préventive en se basant sur des modèles analytique d'optimisation et l'évaluation de l'indisponibilité des équipements de production de maintenance par l'intermédiaire des indicateurs de performance de maintenance qui sont regroupés dans un tableau de bord qui permet de traiter plusieurs informations, de façon à caractériser l'état et l'évolution d'une situation donnée. L'utilisation de tableaux de bord permet de conduire vers une disponibilité maîtrisée des équipements, et vers une réduction des coûts par la connaissance des événements et des activités du service. Ainsi que la méthode Total Productive Maintenance (TPM) basée sur huit piliers, dont le troisième vise à dégager la politique de maintenance adéquate.

Le dernier chapitre de cette thèse est consacré aux études de qui cas sont faites pour évaluer les modèles analytiques proposées de la stratégie de maintenance préventive qu'on a vu théoriquement et implanter les stratégies de maintenance au sein des entreprises d'accueil et de montrer l'intérêt de ce travail dans l'industrie et proposer des solutions d'améliorations, se compose de deux études de cas :

Etude de cas N°1 : Après avoir pris connaissance des moyens de production du service de maintenance, on a effectué une analyse des archives et historiques des interventions de maintenance réalisés et on a apporté notre modeste contribution au niveau de la gestion des interventions.

Des études PARETO et AMDEC ont été effectuée pour détecter les équipements qui ont causé la majorité des problèmes de production.

L'application et évaluation des modèles analytiques proposées de la maintenance basée sur la fiabilité (MBF)

La création d'un tableau de bord afin de suivre les indicateurs de performance des engins du fond durant l'utilisation dans le but d'avoir une vision globale sur l'utilisation de la machine et de l'optimiser, ces indicateurs nous ont permet d'améliorer le temps de production par 11%

On a terminé par une étude et l'analyse de fiabilité durant lequel on a pu détecter des équipements critiques de l'entreprise.

Etude de cas N°2 : notre travail au niveau de la cimenterie avait pour objectif d'optimiser les performances de la chaîne de fabrication tout en tenant compte des changements entrepris et de la qualité du ciment et l'optimisation de la performance de broyeur qui a comme principaux objectifs :

- on a réalisé études de diagnostic des causes de chutes de débits au sein de l'atelier de broyage ;
- on a fait une inspection interne du broyeur ;

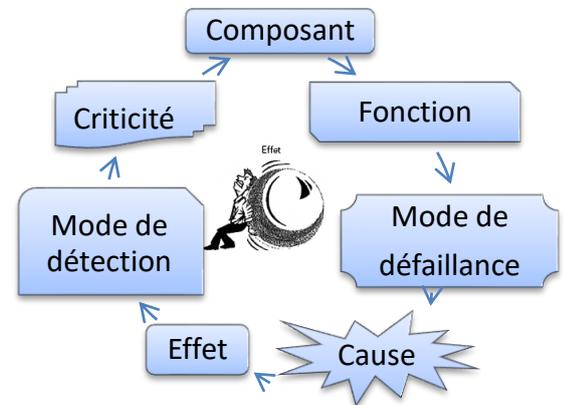
L'adoption de cette optimisation nous permet d'augmenter la cadence de production par 15%.

A la fin de ce mémoire, nous rappelons que nous avons traité la problématique de l'impact de la stratégie de maintenance et le rendement des organisations industrielles par des études approfondies de l'état de l'art sur les stratégies de maintenance, et aussi par l'étude et l'amélioration des méthodes d'optimisation de la maintenance. Nous avons donné un intérêt particulier à l'amélioration de la méthode d'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité (OMF) ainsi que la méthode Total Productive Maintenance (TPM). Et expliquer la problématique théoriquement et pratiquement par des études de cas qui sont faites pour évaluer les modèles analytiques proposées de la stratégie de maintenance préventive.

ANNEXE 1 : Analyse AMDEC pour TORO

Introduction sur l'AMDEC :

L'Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et leurs Criticité (AMDEC) est une méthode de réflexion créative qui repose essentiellement sur la décomposition systématique d'équipement en éléments simples jusqu'au niveau des composants les plus élémentaires afin d'évaluer et de garantir la sûreté de fonctionnement des machines par la maîtrise des défaillances. Cela consiste à faire une analyse systématique et exhaustive des défauts possibles de chacun de ces éléments, et de les hiérarchiser par le biais de leur criticité à travers :



- La fréquence d'apparition des défaillances appelée aussi probabilité d'occurrence
- La gravité des conséquences ou gravité des effets
- La probabilité de ne pas découvrir l'effet ou probabilité de non détection.

Cependant l'AMDEC est une méthode de prospection inductive par excellence. Elle est pratiquée sur le Système lui-même est sur l'ensemble des éléments qui le compose, on énumère ainsi :

- **AMDEC Produit** : analyse de la conception d'un produit pour améliorer la qualité et la fiabilité de celui-ci.
- **AMDEC processus** : analyse des opérations de production pour améliorer la qualité de fabrication du produit.

AMDEC machine : analyse de la conception et / ou de l'exploitation d'un moyen ou d'un équipement de production pour améliorer la sûreté de fonctionnement (sécurité, disponibilité, fiabilité, maintenabilité) de celui-ci.

Elle a pour objectif final l'obtention, au meilleur coût, du rendement global maximum des machines de production et équipements industriels. Son rôle n'est pas de remettre en

cause les fonctions de la machine mais plutôt d'analyser dans quelle mesure ces fonctions ne peuvent plus être assurées correctement. L'étude de l'AMDEC machine vise à :

- Réduire le nombre de défaillances
- Réduire le temps d'indisponibilité après défaillance
- Améliorer la sécurité
- Recensement et évaluation des défaillances :

Pour recenser les défaillances, trouver leurs causes et leurs effets, je me suis basées sur des agents de terrain pour me citer les défaillances qu'ils ont déjà rencontrées sur cette station et les historiques des interventions pour signaler toutes les défaillances possibles.

Grâce à toutes ces informations, j'ai pu commencer à remplir le tableau de l'AMDEC, il ne me reste plus qu'à déterminer la criticité.

Cotation de la gravité :

Les deux critères majeurs dans la cotation de la gravité sont le temps d'arrêt

Cotation	Définition de la gravité
1	Temps d'arrêt moins d'un poste
2	Temps d'arrêt égal à un poste
3	Temps d'arrêt égale à deux postes
4	Temps d'arrêt plus que trois postes

Tableau 1: Grille de cotation de la gravité.

Cotation de la fréquence :

Cotation	Définition de la fréquence
1	Rare : moins d'une fois par an

2	Moyen : une fois par 6 mois
3	Fréquent : une fois par mois
4	Très fréquent : plus qu'une fois par mois

Tableau 2 : Grille de cotation de la fréquence des défaillances.

Cotation du non détection :

Cotation	Définition de la non détection
1	Défaillance facile à détecter
2	Il y a un risque que la détection ne soit pas efficace (visuel)
3	le moyen de détection n'est pas fiable
4	Pas de moyen de détection

Tableau 3 : Grille de cotation du non détection des pannes.

Calcul de la criticité (C) :

La valeur de la criticité pour chaque combinaison cause / mode / effet, est calculée par le produit des niveaux atteints par les critères de cotation.

$$C = F \times N \times G$$

L'AMDEC POUR LE GROUPE A:

Pour quoi l'AMDEC pour le groupe A ?

Afin de comprendre la source des problèmes, et y remédier en apportant les solutions préventives, correctives ou amélioratrices convenables, pour répondre pleinement aux objectifs de cette étude (diminuer le taux de criticité de ce groupe A).

Matériel					criticité				
Elément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet sur le système	G	F	D	C	Action à mener
flexible	Transmettre l'huile ou le gasoil sous pression vers les organes actionneurs	Éclatement de flexible	Frottement avec le châssis ou un autre flexible Manque de précision des longueurs des flexibles	Fuite d'huile Échauffement de la pompe Arrêt de l'engin	1	4	1	4	Changement de flexible Arrangement des flexibles calcul des longueurs des flexibles pour ne pas avoir des flexibles très long qui vont frotter sur le châssis. Mise en place des éléments d'isolation (en caoutchouc) pour diminuer les frottements
vérin	Transformer la pression du fluide en mouvement linéaire	Usure des joints à lèvres Usure de la	Durée de vie Usure de la tige Chute de roche	Fuite interne Chute de bras Fuite interne	1	4	2	8	Remplacement de la tige. mise en place des éléments de protection

Les annexes

		tige	sur le vérin Heurtement contre les parois	Chute de bras					
filtres	Filtre à bain d'huile : filtration de l'air de combustion	Détérioratio n de filtre à bain d'huile	Surcharge de travail Accident, heurtement Durée de vie	Présence de corps étrangers dans la chambre de combustion Usure du moteur Diminution de la durée de vie du moteur	1	4	1	4	Contrôle systématique des filtres. Remplacement des filtres à bain d'huile
Moteur	Transformer l'énergie thermique en énergie	Manque de puissance	Niveau d'huile trop haut manque	Arrêt lorsque l'engin remonte une rampe et lorsqu'il est en	1	3	3	9	Contrôle journalier de niveau d'huile Contrôle d'étanchéité de la conduite d'aire Contrôle et changement des injecteurs Contrôle, nettoyage ou remplacement des

Les annexes

	mécanique et donner le mouvement de rotation des roues	d'étanchéité de la conduite d'air de suralimentation	charge					filtres
		injecteur d'effectueux						
		présence d'air dans le système d'alimentation en combustible.						
		Filtre à combustible encrassé						
	Échauffement du moteur	Desserrage des boulons de fixation des refroidisseurs (fuite d'air)	Augmentation de la température du moteur.	1	4	2	12	Contrôle et serrage des boulons de fixation. Contrôle et nettoyage de refroidisseur Contrôle + remplacement de soufflante
		Refroidisseur d'huile/ailettes de refroidissement encrasser						
		Soufflante de refroidissement						

Les annexes

			défectueuse						
			Filtre d'aire encrasser/turbo compresseur d'échappement défectueux						Contrôle journalier de niveau d'huile Contrôle + remplacement de filtre d'aire Contrôle + remplacement des injecteurs
			Injecteur défectueux						
Pneus	Assurer le déplacement du TORO	Détérioration des pneus Détérioration de joint	Usure de pneu (normale) Pneu dégonfler Éclatement par obstacle Frottement par	Arrêt total de l'engin	2	2	1	4	Changement de pneu détériorer Changement de joint Contrôle de la pression des pneus contrôle + amélioration de la piste Appliquer la maintenance conditionnelle pour le changement des pneus

Les annexes

			glissement Mauvaise conduite						
Frein de parque	Assure l'arrêt de l'engin en parque	Usure des joints d'étanchéité Usure de tamis usure des plaquettes Fuite dans vérin de frein	durée de vie manque de jeu fonctionnel entre les plaquettes et le disque coincement de la manette de frein Usure de joint	Usure du disque Risque de détérioration du cardan manque de freinage	1	3	2	6	Changement des plaquettes Réglage du jeu. Contrôle de la manette de frein Contrôle d'étanchéité + changement des joints

ANALYSE AMDEC pour JUMBO.

Système : ENGIN JUMBO		Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leurs criticités							
les Sous-système : flexibles -câbles									
élément	fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet sur le système	G	F	D	C	Solution proposé
flexible	transmettre la puissance aux actionneurs	éclatement	Chute des blocs sur les flexibles	L'arrêt de la foration + perte de l'huile	1	4	1	4	Changement de flexible Arrangement des flexibles calcul des longueurs des flexibles pour ne pas avoir des flexibles très long qui vont frotter sur la terre Mise en place des éléments d'isolation (en caoutchouc) pour diminuer les frottements
			Usure						
		Chute des blocs sur les flexibles							
		Frottement avec le sol							
		Les dimensions du constructeur ne sont pas respectées							
cables	translater le marteau perforateur	Dérayage	mauvais alignement	arrêt de la machine	1	4	1	4	Nettoyage quotidien de la glissière
		Usure	présence des roches sur la glissière						
		Coupure	la détente						

Les annexes

Système : ENGIN JUMBO		Analyse des modes de défaillance de leurs effet et de leurs criticité							
les Sous-système :Marteau									
élément	fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	effet sur le système	G	F	D	C	Solution proposé
le réducteur	transmettre la puissance avec diminution de la vitesse et augmentation du couple	usure des dentures	fuite interne d'eau	échauffement du marteau + diminution du rendement	1	4	4	16	Graissage journalier du marteau
			manque de graisse						
			vibration du marteau						
le nez	guider la tige	Fuit d'eau	usure des joints	Présence de la poussière pendant la foration	1	4	1	4	
le moteur	assurer la rotation de la tige	fuite	usure des arrêts d'huile	Diminution de la puissance de foration + perte de l'huile	1	4	1	4	Changement des joints périodiquement

Les annexes

Système : ENGIN JUMBO		Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leurs criticités							
les Sous-système : Glissière-tête d'encrage									
élément	fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	effet sur le système	G	F	D	C	Solution proposé
Glissière	supporter le marteau	vibration de la glissière et du marteau	usure du buching ou matériau du beching non élastique	détérioration de la Glissière	1	4	1	4	Changement des slides après usures
tête d'encrage	fixation de la glissière sur le front	jeu de la tête d'encrage	matériaux du beching non élastique	détérioration de la Glissière	1	4	1	4	Respecter le mode opératoire Et respecter le matériau du beching

Système : ENGIN JUMBO		Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité							
les Sous-système : Marteau									
élément	fonction	Mode	Cause	effet sur le système	G	F	D	C	Solution proposé
Adapteur (coudes, raccords)	Raccorder deux organes hydrauliques	desserrage	Chute de bloc ou choc avec le parement +fortement sur le sol	L'arrêt de la foration + perte de l'huile	1	4	1	4	Mettre des petites tôles sur les coudes et les raccords exposés aux chocs

ANNEXE 2 : Rapport des interventions

Nombre d'arrêt c'est difficile à calculer c'est pour cela on propose cette fiche de Rapport des interventions

<u>Engin</u>	<u>L'intervention</u>	<u>Durée de l'intervention</u>	<u>Numéro d'arrêt</u>

Donc si on exploite cette fiche d'intervention on peut calculer le nombre d'arrêt et le temps d'arrêt et par conséquent on va calculer Indice de maintenabilité : MTTR

ANNEXE 3 : programme d'entretien

Moteur	Contrôle journalier des refroidisseurs:
	Nettoyage
	Serrage des boulons de fixation
	Contrôle le niveau d'huile
	Disposition d'un réservoir de remplissage gradué.
	Contrôle systématique de la conduite d'air de suralimentation
	Appoint journalier du gasoil chaque poste
	Contrôler les indicateur de niveau de gasoil chaque poste
☐ Flexibles	Détermination des longueurs des flexible avant de le changer
	Arrangement des flexible chaque poste pour les protéger
	Mise en place des éléments de protection en caoutchouc
Cardan	Mise en place des écroues
	Contrôle journalier
	Mise en place d'un carter de protection
	Graissage journalier des croisillons
Pneu	Contrôle des pneus chaque poste
	Contrôler l'état de la valve
	Contrôler la pression de la chambre à air
	Aménagement du la piste

A chaque poste	Effectué
Vérifier l'huile moteur	
Vérifier les courroies trapézoïdales	
Vérifier visuellement l'état des filtres à air	
Vérifier les gaines d'admission et d'échappement	
Vérifier l'huile de transmission	
Vérifier les pneus et les écrous de roue	
Vérifier le niveau d'huile hydraulique	
Mise à l'essai du fonctionnement du frein de service et de stationnement	
Vérifier le système de direction de secours	
Vérifier le fonctionnement du système de desserrage des freins	
Contrôler les principaux composants, leur fixation et vérifier qu'il n'y a pas de fuites	
Contrôler l'extincteur d'incendie manuel	
Contrôler les feux de conduite/travail	
Vérifier les indicateurs et les témoins	
Remplir le réservoir de carburant	
Contrôler visuellement le système automatique de graissage central (option)	
Graisser les goupilles du vérin de levage, les goupilles du vérin d'inclinaison et les goupilles des bras de levage	
Graisser les goupilles de bobine	
Graisser l'articulation centrale, les goupilles du vérin de direction, l'essieu mobile	

Toutes les semaines	
Vérifier l'huile moteur	
Vérifier les courroies trapézoïdales	
Vérifier visuellement l'état des filtres à air	
Vérifier les gaines d'admission et d'échappement	
Nettoyer le refroidisseur d'huile hydraulique	
Vérifier l'huile de transmission	
Vérifier la pression des pneus	
Vérifier le niveau d'huile hydraulique	
Mise à l'essai du frein de service et de stationnement	
Essayer l'hydraulique de transmission, essai A	
Enregistrement	
Essayer l'hydraulique du godet, essai B	
Enregistrement	
Essayer l'hydraulique de direction, essai S	
Enregistrement =	
Vérifier le système de direction de secours	
Vérifier le fonctionnement du système de desserrage des freins	
Contrôler les principaux composants, leur fixation et vérifier qu'il n'y a pas de fuites	
Contrôler l'extincteur d'incendie manuel	
Contrôler les feux de conduite/travail .	
Vérifier les indicateurs et les témoins	
Remplir le réservoir de carburant	
Contrôler visuellement le système automatique de graissage central	
Graisser les goupilles du vérin de levage, les goupilles du vérin d'inclinaison et les goupilles des bras de levage	
Graisser les goupilles de bobine	
Graisser l'articulation centrale, les goupilles du vérin de direction, l'essieu mobile* .	
Vérifier le bon fonctionnement du système de télécommande	

ANNEXE 4: taux de remplissage

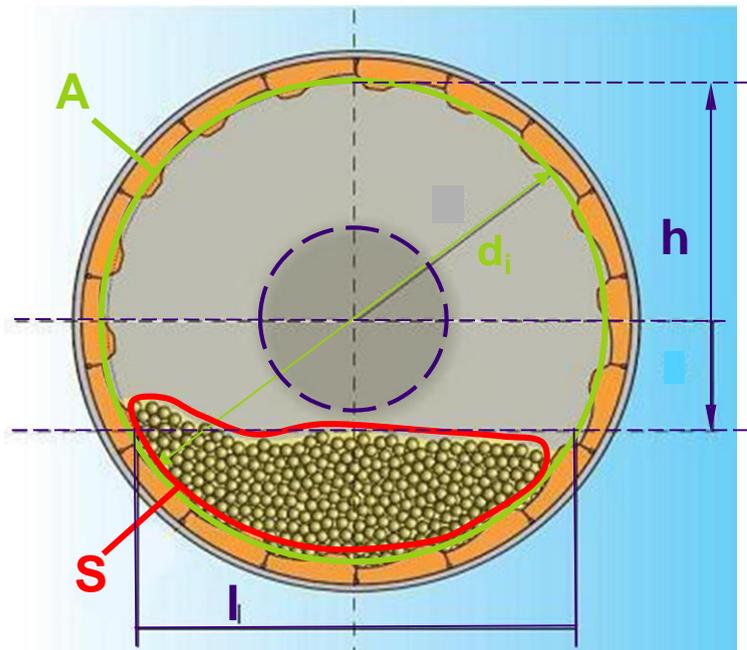
Le taux de remplissage

Un autre paramètre important est le volume du broyeur occupé par les boulets, ce paramètre influence directement l'action du broyage.

Le taux de remplissage est défini par la relation suivante :

$$\text{Taux de remplissage}(\%) = \frac{\text{Volume apparent}}{\text{volume utile}} \times 100$$

$$F = \frac{S}{A} \cdot 100[\%]$$



A = surface libre

S = superficie de charge

La superficie apparente de la charge :

$$S = \frac{\text{poids de la charge}}{\text{densité apparente} \times \text{longueur de compartiment}}$$

Pour le 1^{er} compartiment : la densité apparente = **4.5 à 4.6 t/m³**

Pour le 2^{ème} compartiment : la densité apparente = **4.8 t/m³**

La surface libre est

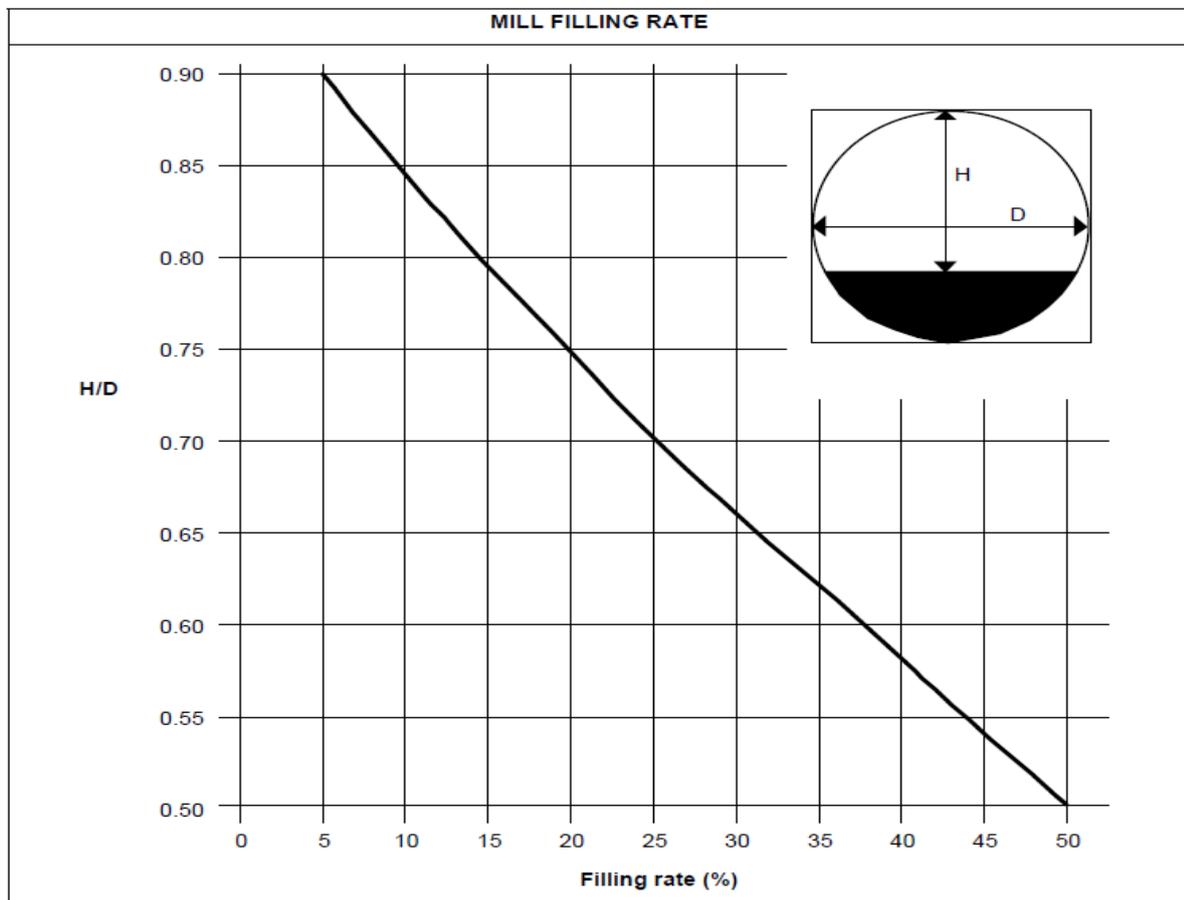
$$A = \frac{\pi \times d_i^2}{4}$$

A l'échelle industrielle il est difficile de déterminer la masse des boulets dans le broyeur et par la suite de déterminer sa superficie apparente en connaissant la densité, mais il est possible d'arrêter le broyeur et de mesurer la taille libre [h'] et le diamètre intérieur clair [di] seulement en utilisant la formule suivante :

$$S = \frac{d_i - h'}{6 \cdot l} \cdot [3 \cdot (d_i - h')^2 + 4 \cdot l^2] \quad [m^2]$$

Avec :

$$l = \sqrt{8 \cdot (d_i - h') \cdot \left[\frac{d_i}{2} - \frac{(d_i - h')}{2} \right]} \quad [m]$$



ANNEXE 5 : Techniques d'analyse granulométrique

1. Le tamisage : C'est la méthode la plus ancienne et encore très largement utilisée car la plus économique. Elle consiste à mesurer

le poids de matière qui passe au travers des mailles calibrées d'une toile de tamis. On superpose les tamis par maille décroissante et l'on mesure le poids de matière retenue sur chaque tamis. Cette opération peut se réaliser à sec, et en vibrant l'ensemble de la colonne de tamis, pour des grains de taille relativement importante. Lorsque la population des grains comporte quelques éléments très fins, on associe une dépression d'air.



2. L'analyse granulométrique par diffraction laser :

Le granulométrie laser est sensible au volume des particules comme le tamis est sensible à la masse des particules.

La granulométrie par diffraction laser, est une technique reconnue universellement pour la caractérisation de la taille des particules.

Cette caractérisation est critique pour la mise au point des performances des matières premières, produits intermédiaires et produits finis de nombreuses industries voire l'industrie du ciment.

3. Principe de fonctionnement de la granulométrie laser :

Le granulométrie laser est basée sur le principe de la diffraction de la lumière. Les particules en suspension (dans l'eau ou dans un courant d'air) diffractent la lumière émise par un faisceau laser. La répartition spatiale de cette lumière, fonction de la taille des particules. L'analyse de cette distribution permet de déterminer la proportion de chaque classe dimensionnelle. Cela permet de réaliser des mesures de tailles bien plus faibles



Dispositif de la granulométrie par laser

Références bibliographiques

- [1] Robert 04 Ouvrage collectif sous la direction de Rey-Debove J., Rey A., Le Petit Robert, Dictionnaire de la langue française, Ed. Dictionnaires Le Robert (1e édition de 1967), Paris, ISBN 2-85036-976-4, 2004.
- [2] [3] [6] Norme AFNOR NF EN 13306, "Terminologie de la maintenance" (ancienne norme NF X60-010), Ed. Afnor, Paris, 2001.
- [4] Laprie J.C., Arlat J., Blanquart J.P., Costes A., Crouzet Y., Deswarte Y., Fabre J.C.,Guillermain H., Kaaniche M., Kaoun K., Mazet C., Powell D., Rabejac C., Thevenod-Fosse P., Guide de la sûreté de fonctionnement, Ed. Cepaduès, ISBN 2-85428-382-1, 1995.
- [5] Norme AFNOR X 60-500, "Terminologie relative à la fiabilité - Maintenabilité - Disponibilité", Ed. Afnor, Paris, 1988.
- [7] - Kaffel H., D'Amours S., Ait-Kadi D., "Les critères techniques pour le choix des acteurs dans un système de maintenance distribuée", 1er Colloque international francophone sur la Performance et les Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM'03), Valenciennes, France,2003.
- [8] Norme AFNOR X 60-301, "Guide pour la prise en compte des critères de maintenabilité des biens durables à usage industriel et professionnel", Ed. Afnor, Paris, 1982.
- [9] Norme AFNOR X 60-000, "Maintenance industrielle – Fonction maintenance", Ed.Afnor, Paris, 2002.
- [10] Monchy F., Maintenance, Méthodes et Organisations, Ed. DUNOD, Coll. L'Usine Nouvelle Série Gestion Industrielle (2e édition), Paris, ISBN 2-10-007816-5, 2003.
- [11] Mechin B., "Maintenance : concepts et définitions", Techniques de l'Ingénieur, MT 9030,2007
- [12] Maillet P., "Approche normative des métiers de la maintenance industrielle - État de l'art des progiciels du domaine", Mémoire en informatique, Conservatoire des arts et métiers,2005.
- [13] Pérès F., Noyes D., "Envisioning e-logistics developments: making spare parts in situ and on demand - State of art and guidelines for future developments", Computers in Industry, 57 (6), p. 490-503, 2006.

- [14] G. Zwingelstein. La maintenance basée sur la fiabilité : Guide pratique d'application de la rcm. Collection Diagnostic et maintenance. Hermès, 1996
- [15] AFNOR (1988). Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité. Recueil de Normes Françaises, AFNOR.
- [16] Monchy, F. (2000). Maintenance. Méthodes et organisations. technique et ingénierie, Dunod.
- [17] EN 13306., Terminologie de la maintenance, EN 13306 X60-319, juin, 2001.
- [18] Castanier B., Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, 2002.
- [19] Despujols A., Approche fonctionnelle de la maintenance, MT9020, Techniques de l'ingénieur, Octobre, 2004.
- [20] Caputo A.C. and Salini P., Influence of Preventive Maintenance Policy on Manufacturing Systems Performances, Proceedings of the World Congress on Engineering, WCE 2009, July 1 - 3, London, U.K., 2009.
- [21] [30] Sherwin, D. (2000). A review of overall models for maintenance management. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 6(3), 138–164.
- [22] [25] [31] Adzakpa, K.P. (2004). Maintenance des systèmes distribués : méthodes d'aide à la décision temps-réel. Ph.D. thesis, Université de Technologie de Troyes.
- [26] Chelbi, A. and Aït-Kadi, D. (2009). Inspection strategies for randomly failing systems. In Handbook of Maintenance Management and Engineering, 303–335. Springer, London.
- [24] [23] [27] Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models : a review and analysis. Reliability Engineering & System Safety, 51(3), 229–240.
- [28] Scarf, P.A. (1997). On the application of mathematical models in maintenance. European Journal of Operational Research, 99(3), 493–506.
- [29] Sharma, A., Yadava, G., and Deshmukh, S. (2011). A literature review and future perspectives on maintenance optimization. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 17(1), 5–25.
- [32] Laugier, A., Allahwerdi, N., Baudin, J., Gaffney, P., Grimson, W., Groth, T., and Schilders, L. O. Remote instrument telemaintenance. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 50(2), 187–194.

- [33] Léger J.B. (1999). Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes industriels de production : proposition d'un cadre formel de modélisation. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy.
- [34] Mendez-Azua H. (2002). Commande / surveillance supervisée : exploitation des modes de marches pour l'intégration des stratégies d'entreprise. Thèse de Doctorat en Automatique-Productique, Laboratoire d'Automatique de Grenoble.
- [35] Charles A-S. (2000). Modélisation des défaillances des équipements d'une unité de production de composants électroniques. Optimisation des stratégies de maintenance. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [36] Francastel J.C. (2001). Externalisation de la maintenance: Strategies, methods et contrats. Edition DUNOD.
- [37] Van Dijkhuizen G. (1998). Maintenance meets Production: On the Ups and Downs of a Repairable System. Thèse de Doctorat, Proefschrift Universiteit Twente, Enschede.
- [39] - AFNOR NF EN 13306 (2001). Terminologie de la maintenance.
- [41] Richard E Barlow and Frank Proschan. Mathematical theory of reliability. John Wiley sons, 1965.
- [42] Toshio Nakagawa, Xufeng Zhao, and Won Young Yun. Optimal age replacement and inspection policies with random failure and replacement times. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 18(05) :405_416, 2011.
- [43] Minjae Park and Hoang Pham. Cost models for age replacement policies and block replacement policies under warranty. Applied Mathematical Modelling, 40(9) :56895702, 2016.
- [44] Mohamed Ben-Daya, Salih O Duuaa, and Abdul Raouf. Maintenance, modeling and optimization. Springer Science & Business Media, 2012.
- [45] Hongzhou Wang. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. European journal of operational research, 139(3) :469489, 2002.
- [46] Chang Hoon Lie and Young Ho Chun. An algorithm for preventive maintenance policy. IEEE Transactions on Reliability, 35(1) :7175, 1986.
- [47] Mazhar Ali Khan Malik. Reliable preventive maintenance scheduling. AIIE transactions, 11(3) :221228, 1979.
- [48] Hoang Pham and Hongzhou Wang. Imperfect maintenance. European journal of operational research, 94(3) :425438, 1996.

- [49] Amit Monga, Ming J Zuo, and Roger W Toogood. Reliability-based design of systems considering preventive maintenance and minimal repair. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 4(01) :5571, 1997.
- [50] J-K Chan and Leonard Shaw. Modeling repairable systems with failure rates that depend on age and maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 42(4) :566571, 1993.
- [51] Hongzhou Wang. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European journal of operational research*, 139(3) :469489, 2002.
- [52] Richard E Barlow and Frank Proschan. *Mathematical theory of reliability*. John Wiley sons, 1965.
- [53] DG Nguyen and DNP Murthy. Optimal preventive maintenance policies for repairable systems. *Operations Research*, 29(6) :11811194, 1981.
- [54] Toshio Nakagawa. Periodic and sequential preventive maintenance policies. *Journal of Applied Probability*, 23(2) :536542, 1986.
- [55] Toshio Nakagawa. Sequential imperfect preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability*, 37(3) :295298, 1988.
- [56] P Gardent and L Nonant. Entretien et renouvellement d'un parc de machines. *Revue Française de Recherche Operationnelle*, 7 :519, 1963
- [57] RW Drinkwater and N AmJ Hastings. An economic replacement model. *Operational Research Quarterly*, 18 :121138, 1967.
- [58] Beichelt Frank. A replacement policy based on limits for the repair cost rate. *IEEE Transactions on Reliability*, R-31(4) :401403, 1982.
- [59] Toshio Nakagawa and Shunji Osaki. The optimum repair limit replacement policies. *Operational Research Quarterly*, 25 :311317, 1974.
- [60] Hajime Makabe and HIDENORI Morimura. A new policy for preventive maintenance. *Journal of Operations Research Society of Japan*, 5 :110124, 1963.
- [61] Hidenori Morimura. *On Some Preventive Maintenance Policies for IFR*. University of North Carolina, Department of Statistics, 1969.
- [39] [44] AFNOR NF EN 13306 (2001). *Terminologie de la maintenance*.
- [63] Barlow, R.E., Hunter, L.C., and Proschan, F. (1963). Optimum checking procedures. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(4), 1078–1095.
- [64] Munford, A.G. and Shahani, A.K. (1972). A nearly optimal inspection policy. *Operational Research Quarterly*, 23(3), 373–379.

- [65] Munford, A.G. and Shahani, A.K. (1973). An inspection policy for the weibull case. *Operational Research Quarterly*, 24(3), 453–458.
- [66] Tadikamalla, P.R. (1979). An inspection policy for the gamma failure distributions. *The Journal of the Operational Research Society*, 30(1), 77–80.
- [67] Chelbi, A. and Aït-Kadi, D. (2009). Inspection strategies for randomly failing systems. In *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, 303–335. Springer, London
- [39] [44] [68] [69] [2] AFNOR NF EN 13306 (2001). Terminologie de la maintenance.
- [70] Valdez-Flores, C. and Feldman, R.M. (1989). A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *Naval Research Logistics (NRL)*, 36(4), 419–446.
- [71] Van Noortwijk, J. (2009). A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(1), 2–21.
- [72] Ropital, F. (2009). Corrosion et dégradation des matériaux métalliques : compréhension des phénomènes et applications dans l'industrie pétrolière et des procédés. IFP Publications.
- [74] Rausand, M. and Hoyland, A. (2004). *System Reliability Theory : Models, Statistical Methods, and Applications*. Wiley, 2 edition.
- [75] Deloux, E. (2008). Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant. Ph.D. thesis, Université de Nantes
- [76] [78] Bassem Bouslah. Conception conjointe des politiques de contrôle de production, de qualité et de maintenance des systèmes manufacturiers en dégradation. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal, 2015.
- [77] [79] [80] L. E. Hanin. Increased transfer line productivity utilizing systems simulation. PhD thesis, University of Detroit, 1975.
- [81] M Abdur Rahim and Mohamed Ben-Daya. *Integrated models in production planning, inventory, quality, and maintenance*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [82] Dijkstra, M., Kroon, L., Salomon, M., van Nunen, J. and van Wassenhoven, L. (1994). Planning the size and organization of KLM's aircraft maintenance personnel, *Interfaces* 24: 47-58.
- [83] Yan, S., Yang, T. and Chen, H. (2004). Airline short-term maintenance manpower supply planning, *Transportation Research Part A* 38: 615{642.

- [84] BengÄu, G. (1994). Telecommunications systems maintenance, *Computers & Operations Research* 21: 337-351.
- [85] Gharbi, A. and Kenne, J. (2005). Maintenance scheduling and production control of multiple-machine manufacturing systems, *Computers & Industrial Engineering* 48: 693-707.
- [86] Dedopoulos, L. and Shah, N. (1995). Preventive maintenance policy optimisation for multipurpose plant equipment, *Computers and Chemical Engineering* 19: 693{698.
- [87] Vatn, J., Hokstad, P. and Bodsberg, L. (1996). An overall model for maintenance optimization, *Reliability Engineering and System Safety* 51: 241{257.
- [88] Frost, D. and Dechter, R. (1998). Optimizing with constraints: a case study in scheduling maintenance of electric power units, *Lecture Notes in Computer Science* 1520: 469{488.
- [89] ShijinWang. Integrated model of production planning and imperfect preventive maintenance policy for single machine system. *International Journal of Operational Research*, 18(2) :140156, 2013.
- [90] S. Dellagi, A. Chelbi, and W. Trabelsi. Joint integrated production-maintenance policy with production plan smoothing through production rate control. *Journal of Manufacturing Systems*, 42 :262270, 2017.
- [91] Bassem Bouslah. Conception conjointe des politiques de contrôle de production, de qualité et de maintenance des systèmes manufacturiers en dégradation. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal, 2015.
- [92] Mustapha Nourelfath, Nabil Nahas, and Mohamed Ben-Daya. Integrated preventive maintenance and production decisions for imperfect processes. *Reliability Engineering & System Safety*, 148 :2131, 2016.
- [93] Radhoui, M., Rezg, N., et Chelbi, A. (2010). « Integrated maintenance and control policy based on quality control ». *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 443-451.
- [94] Rahim, M. A., et Ben-Daya, M. (2001). « Joint Determination of Production Quantity, Inspection Schedule, and Quality Control for an Imperfect Process with Deteriorating Products ». *The Journal of the Operational Research Society*, 52(12), 1370-1378.
- [95] Nahmias, S. (2004). *Production and Operations Analysis*. McGraw Hill Higher Education.
- [96] Budai-Balke, G., Dekker, R., et Robin P, N. (2008). *Complex System Maintenance Handbook*. Springer London, London.

- [97] Finch, B. J., et Gilbert, J. P. (1986). « Developing maintenance craft labor efficiency through an integrated planning and control system: A prescriptive model ». *Journal of Operations Management*, 6(3-4), 449-459.
- [98] Weinstein, L., et Chung, C.-H. (1999). « Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment ». *Computers and Operations Research*, 26, 1059–1074.
- [99] Lee, H.-H. (2005). « A cost/benefit model for investments in inventory and preventive maintenance in an imperfect production system ». *Computers & Industrial Engineering*, 48(1), 55-68.
- [100] Pistikopoulos, E. N., Vassiliadis, C. G., et Papageorgiou, L. G. (2000). « Process design for maintainability: an optimization approach ». *Computers & Chemical Engineering*, 24(2-7), 203-208.
- [101] Budai-Balke, G., Dekker, R., et Nicolai, R. P. (2006). A review of planning models for maintenance and production. Erasmus University Rotterdam, Econometric Institute.
- [102] [103] [104] Groenevelt, H., Pintelon, L., et Seidmann, A. (1992a). « Production Batching with Machine Breakdowns and Safety Stocks ». *Operations Research*, 40(5), 959-971.
- [105] Lin, G. C., et Gong, D.-C. (2006). « On a production-inventory system of deteriorating items subject to random machine breakdowns with a fixed repair time ». *Mathematical and Computer Modelling*, 43(7-8), 920-932.
- [106] Iravani, S. M. R., et Duenyas, I. (2002). « Integrated maintenance and production control of a deteriorating production system ». *IIE transactions*, 34(5), 423-435.
- [107] Yao, X., Xie, X., Fu, M. C., et Marcus, S. I. (2005). « Optimal joint preventive maintenance and production policies ». *Naval Research Logistics*, 52(7), 668-681.
- [108] Tapas K, D., et Sarkar, S. (1999). « optimal preventive maintenance in a production inventory system ». *IIE transactions*, 31(6), 537-551.
- [109] Chelbi, A., et Ait Kadi, D. (2004). « Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit submitted to regular preventive maintenance ». *European Journal of Operational Research*, 156(3), 712-718.
- [110] Kenné, J.-P., Gharbi, A., et Beit, M. (2007). « Age-dependent production planning and maintenance strategies in unreliable manufacturing systems with lost sale ». *European Journal of Operational Research*, 178(2), 408-420.
- [24] [23] [27] [111] Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models : a review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3), 229–240.

- [112] Scarf, P.A. (1997). On the application of mathematical models in maintenance. *European Journal of Operational Research*, 99(3), 493–506.
- [113] Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139(3), 469–489.
- [114] Barlow, R.E. and Proschan, F. (1965). *Mathematical theory of reliability*. John Wiley & Sons.
- [115] Nakagawa, T. (1979). Optimum policies when preventive maintenance is imperfect. *IEEE Transactions on Reliability*, R-28(4), 331 –332.
- [116] Antoine DESPUJOLS, *Méthodes d’optimisation des stratégies de maintenance*, Techniques de l’ingénieur, 2005.
- [117] CEN (European Committee for Standardization), (2001) EN 13306:2001 Maintenance terminology. European Standard. Brussels: CEN.
- [118] Van Horenbeek A, Pintelon L, Muchiri P (2011) Maintenance optimization models and criteria. *Int J Syst Assur Eng Manag* 1(3):189–200
- [119] Vanneste SG, Van Wassenhove LN (1995) An integrated and structured approach to improve maintenance. *Eur J Oper Res* 82: 241–257
- [120] [122] AFNOR X-06-501
- [121] [123] AFNOR X-06-010
- [124] [125] A. Riali, A. Talbi. *Ingénierie de la maintenance industrielle*. Doctorants, Laboratoire de Productique, énergétique et Développement Durable, Ecole Supérieure de Technologie.
- [126] Yamashina, H. (1995). Japanese manufacturing strategy and the role of total productive maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1 No. 1, pp.27-38.
- [127] Brah, S. A., & Chong, W. K. (2004). Relationship between total productive maintenance and performance. *International Journal of Production Research*, 42(12), 2383-2401.
- [128] Patterson, J.W., Fredendall, D.L., Kennedy, W.J. and McGee, A. (1996). Adapting total productive maintenance to Asten, Inc.
- [129] Nakajima, S., *La maintenance productive totale : nouvelle vague de la production industrielle TPM*, Paris, AFNOR, 1986. 139p.
- [130] R.C. HANSEN. *Overall equipment effectiveness: a powerful production / maintenance tool for increased profits*. Industrial Press. 2001.

- [131] C.J. BAMBER, P. CASTKA, J.M. SHARP, Y. MOTARA. Cross-functional team working for overall equipment effectiveness (OEE). *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 9/3 : 223 - 238. 2003.
- [132] R.C. HANSEN. Overall equipment effectiveness: a powerful production / maintenance tool for increased profits. Industrial Press. 2001.
- [133] X. Boraux, TPM en quelques mots. E.R.I.C.S Associes, Décembre 2003.
- [134] La norme X50-150 définit Analyse de la valeur et l'analyse fonctionnelle
- [135] Dekker, R., 1996, "Applications of maintenance optimization models: A review and analysis", *Reliability Engineering and System Safety*, 51(3):229-240.
- [136] Sandve, K., Aven, T., 1999, "Cost optimal replacement of monotone, repairable systems", *European Journal of Operational Research*, 116(2):235–248.
- [137] Boschian, V., Rezg, N., Chelbi, A., 2009, "Contribution of simulation to the optimization of maintenance strategies for a randomly failing production system", *European Journal of Operational Research*, 197(3):1142–1149.
- [138] Chung, S.H., Lau, H.C.W., Ho, G.T.S., Ip, W.H., 2009, "Optimization of system reliability in multi-factory production networks by maintenance approach", *Expert Systems with Applications*, 36(6):10188–10196.
- [139] Ghosh, D., Roy, S., 2009, "Maintenance optimization using probabilistic cost-benefit analysis", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4):403-407.
- [140] Samrout, M., Châtelet, E., Kouta, R., Chebbo, N., 2009, "Optimization of maintenance policy using the proportional hazard model", *Reliability Engineering and System Safety*, 94 (1): 44-52.
- [141] Hsu, L.F., 1999, "Simultaneous determination of preventive maintenance and replacement policies in a queue-like production system with minimal repair", *Reliability Engineering and System Safety*, 63(2):161-167.
- [142] Tsai, Y.T., Wang, K.S., Teng, H.Y., 2001, "Optimizing preventive maintenance for mechanical components using genetic algorithms", *Reliability Engineering and System Safety*, 74(1):89-97.
- [143] Park, D.H., Jung, G.M., Yum, J.K., 2000, "Cost minimization for periodic maintenance policy of a system subject to slow degradation", *Reliability Engineering and System Safety*, 68(2):105-112.
- [144] Levitin G, Lisnianski, A., 2000, "Optimization of imperfect preventive maintenance for multi-state systems", *Reliability Engineering and System Safety*, 67(2):193-203.

- [145] Zhao, Y.X., 2003, “On preventive maintenance policy of a critical reliability level for system subject to degradation”, *Reliability Engineering and System Safety*, 79(3):301-308.
- [146] Bartholomew-Biggs, M., Zuo, M., Christianson, B., 2006, “Optimizing preventive maintenance models”, *Journal of Computational Optimization and Applications*, 35:261–279.
- [147] Duarte, J.A.C., Craveiro, J.C.T.A., Trigo, T.P., 2006, “Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83(4):244-248.
- [148] Enrique Castillo, Roberto Mínguez, Carmen Castillo, Sensitivity analysis in optimization and reliability problems. *Reliability Engineering & System Safety* 2008; 93(12): 1788-1800.
- [149] Harish D. Goel, J. Grievink, M.P.C. Weijnen, Integrated optimal reliable design, production, and maintenance planning for multipurpose process plants. *Computers & Chemical Engineering* 2003; 27(11): 1543-1555.
- [150] Retour D., Bouche M., Plauchu V., Où va la maintenance industrielle, problèmes économiques, no 2.159, 1990, pp 7-13.
- [151] Ming, T. and Su, Y., LS-SVC based recognition method of the centrifugal pump cavitation intensity. *Proceeding of the International Conference on Electric Information and Control Engineering, ICEICE 2011*, paper no. 5777826, pp. 3335-3338.
- [152] Ewald, F., 2002, La détermination des responsabilités, Les risques industriels et technologiques, *Documentation française*, n°882, Novembre 2002, p.45.
- [153] Lung B, Morel G, Leger J.B, Proactive maintenance strategy for harbour crane operation improvement, *Robotica*, vol 21, 2003, pp 313-324.
- [154] C.G. Vassiliadis, J. Arvela, E.N. Pistikopoulos, L.G. Papageorgiou, Planning and maintenance optimization for multipurpose plants. *Computer Aided Chemical Engineering*, Volume 8, 2000, Pages 1105-1110.
- [155] Lyons, M., Adams, S., Woloshynowych, M., Vincent, C., 2004, Human reliability analysis in healthcare: A review of techniques, *International Journal of Risk & Safety in Medicine*, Vol.16, pp. 223–237.
- [156] Stanley Nowlan F. and H. Heap, *Reliability-Centered Maintenance*, Washington, DC, Department of Defense, Report Number AD-A066579. *Reliability-Centered Maintenance*, San Francisco: Dolby Access Press, 1978.

- [157] Operator/Manufacturer Scheduled Maintenance Development (MSG-3), Air Transport Association (ATA), Washington, DC, 2001.
- [158] MIL-STD 2173 (AS), Reliability-Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapons Systems and Support Equipment, U.S. Naval Air Systems Command, 1986, p.265.
- [159] NA VAIR 00-25-403, Guidelines for the Naval Aviation Reliability Centered Maintenance Process, US. Naval Air System Command, 2001.
- [160] RCM Implementation Team, Royal Navy, NES 45 Naval Engineering Standard 45, Requirements for the Application of Reliability-Centered Maintenance Techniques ta HM Ships, Royal Fleet Auxiliaries and other Naval Auxiliary Vessels, United Kingdom, UK Ministry of Defence Publications, 1999.
- [161] Moubray, J. ,Reliability Centered Maintenance II, Industrial Press, 2nd Edition, 1997.
- [162] Zwinelstein, G. ,La maintenance basée sur la fiabilité, HERMES, Paris, 1996.