



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en Électromécanique

MÉMOIRE

Filière : Électromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle en Électromécanique

Thème

Étude de fiabilité d'une chaîne de production chez : STPM CHIALI La ligne F

Présenté et soutenu publiquement par :

FEKIR ABDELMALEK

DAANE BILAL

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Lalaoui Mohamed	MAA	IMSI	Président
Labair Hakima	MCB	IMSI	Encadreur
Harouz Keltoum	MCB	IMSI	Examineur

Année 2024/2025

Remerciement

On remercie séparément dieu le plus puissant, qui rends les choses faciles et qui nous guide vers nos objectifs, de nous avoir donné la santé et la patience de terminer ce mémoire.

Ensuite, nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères à notre encadrante Mme. Labair pour son soutien et sa précieuse aide lors de l'élaboration de ce travail.

Nous remercions aussi l'ensemble du personnel du groupe CHIALI pour leur accueil chaleureux, leur partage d'information et la fourniture des données nécessaires pour la réussite de ce projet.

Nous remercions très sincèrement, les membres des jurys d'avoir bien voulu accepter de faire la commission.

Nous remercions également tous nos proches et amis qui nous ont toujours encouragés et soutenu au cours de la réalisation de ce travail ainsi qu'à nos profs qui ont contribué à la réussite de toute année de cette formation enrichissante.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous qui ont participé de près ou de loin à notre réussite, aux personnes qui ont une faveur sur nous.

MERCI À TOUS



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail comme remerciement à la première école éducative où j'ai pris des leçons de vie, de l'éducation, de la morale, où j'ai appris à parler, écrire, penser et être qui je suis aujourd'hui : **Mes chers parents** qui ont m'accompagné à tout moment avec leurs motivations, leurs sacrifices, leurs conseils et leur duaa. Je suis très reconnaissant pour vous.*

*Je remercie **mes collègues** et **mes amis** tous particulièrement. Je dédie tout la famille **Daane** et **Bouchenak** pour leur beau vœu de me voir réussi tout au long de mon cursus.*

Bilal



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents :

Source inépuisable de patience et de sacrifice.

Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais jamais exprimer ma grande affection et ma reconnaissance. Le soutien et les sacrifices qu'ils ont fait pour moi au long de ma vie juste pour que je réussis, aujourd'hui leurs encouragements sont une part importante de la réussite de mes études.

À mes chers frères

Je vous souhaite tout le bonheur. Un grand merci à eux, pour leur encouragement, leur grand amour et m'ont permis de battre toutes les difficultés.

*Je remercie **mes collègues** et **mes amis** tous particulièrement.*

*Je dédie tout la famille **Fekir et benabdessalem** pour toute assistance et présence dans ma vie.*

Malek

Résumé :

La fiabilité joue un rôle crucial dans le secteur industriel en garantissant la stabilité et la régularité des processus de production. Elle assure le bon fonctionnement des équipements, la conformité des produits aux exigences de qualité, ainsi que la minimisation des pannes et des interruptions. Cela contribue non seulement à la satisfaction des clients, mais aussi à la compétitivité de l'entreprise.

L'objectif de ce travail est d'évaluer la fiabilité d'une chaîne de production particulière. À travers des méthodes d'analyse statistique et des modèles probabilistes, nous identifions les principales causes des défaillances et proposons des solutions pour améliorer la fiabilité globale du système de production. Ce mémoire offre ainsi des recommandations concrètes pour optimiser l'efficacité opérationnelle et maintenir la compétitivité de l'entreprise.

ملخص:

تمثل الموثوقية دورًا هامًا في الصناعة من خلال ضمان استقرار وثبات عمليات الإنتاج. فهي تضمن أداء المعدات، وامتثال المنتجات لمعايير الجودة، وتقليل الأعطال ووقت التوقف كما تسهم في رضا العملاء وتعزيز قدرة الشركة التنافسية.

يتمثل عملنا في تقييم موثوقية سلسلة إنتاج محددة. باستخدام طرق التحليل الإحصائي ونماذج احتمالية، نحدد الأسباب الرئيسية للأعطال ونقدم تحسينات لزيادة الموثوقية الكاملة لسلسلة الإنتاج كما نقدم هذه المذكرة توصيات عملية لتحسين الكفاءة التشغيلية وكذا ضمان الإنتاجية الجيدة.

Abstract:

Reliability is a key factor in the industry, ensuring the stability and consistency of production processes. It ensures the optimal performance of equipment, adherence to quality standards, minimization of breakdowns and downtime, and plays a vital role in customer satisfaction and the competitiveness of the company. Our study aims to assess the reliability of a specific production chain. By employing statistical analysis techniques and probabilistic models, we identify the root causes of failures and suggest improvements to boost the overall reliability of the production chain. This thesis offers actionable recommendations to enhance operational efficiency and maintain the company's competitive edge.

Table des matières

Introduction générale :	19
-------------------------------	----

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Introduction :	20
1. Historique de la maintenance :	21
2. Terminologies et définitions:	22
2.1. Bien :	22
2.2. Fonction requise :	22
2.3. Panne :	22
2.4. Maintenance :	22
2.4.1. Management de la maintenance:	22
2.4.2. Objectifs la de maintenance :	22
2.4.3. Stratégie de la maintenance :	22
2.4.4. Plan de maintenance :	23
3. Niveaux de la maintenance :	23
4. Types de la maintenance :	24
4.1. Maintenance corrective :	25
4.1.1. Maintenance palliative :	25
4.1.2. Maintenance curative:	25
4.2. Maintenance préventive:	25
4.2.1. Maintenance systématique :	26
4.2.2. Maintenance conditionnelle :	26
4.2.3. Maintenance prévisionnelle :	27
5. Actions de la maintenance :	28
5.1 Actions techniques :	28
5.2. Actions administratives :	28
6. Les enjeux de la maintenance :	29
6.1. Enjeux économiques :	29
6.2. Enjeux technologiques :	30
6.3. Enjeux sociaux :	30
7. Les indicateurs de performance :	30
• Taux d'engagement du bien :	30

•	Indicateur de disponibilité opérationnelle :.....	30
•	Taux d'utilisation d'un bien :.....	31
•	Indice de comparaison des performances d'exploitation :.....	31
•	Pénalité d'indisponibilité :	31
•	Indicateurs des effets externes :	31
•	Indicateur d'efficacité globale :	31
•	MTBF « Mean Time Between Failure » :.....	31
•	MTTR « Mean Time To Repair » :.....	32
•	MUT (Mean Up Time) :	32
•	MDT (Mean Down Time) :.....	32
8.	Objectifs de la maintenance:.....	33
9.	Rôle de la maintenance :.....	33
	Conclusion :	34

Chapitre II : FMD (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité)

	Introduction :.....	36
1.	La fiabilité d'un système:	37
1.1.	Définition de la fiabilité:.....	37
1.2.	Types de fiabilité :	37
1.2.1.	Fiabilité opérationnelle :	37
1.2.2.	Fiabilité prévisionnelle :	37
1.3.	Les paramètres nécessaires de la fiabilité :.....	38
1.3.1.	Les fonctions $F(t)$ et $R(t)$:	38
1.3.2.	Taux de défaillance instantané $\lambda(t)$:.....	39
1.3.3.	Fonction de densité de probabilité $f(t)$:	40
1.3.4.	MTBF « temps de bon fonctionnement » :	41
1.3.5.	MTTF: « Mean Time To Failure »:	41
1.3.6.	MUT : « Mean Up Time » :.....	41
1.4.	Disposition des systèmes :.....	41
1.5.	Lois de probabilités en fiabilité :.....	43
1.5.1.	Loi uniforme :.....	43
1.5.2.	Loi binomiale :	43
1.5.3.	Loi de poisson :.....	44
1.5.4.	Loi de Bernoulli :.....	44

1.5.5. Loi de survie :	45
1.5.6. Loi exponentielle :	45
1.5.7. Loi normale [Laplace-Gauss] :	46
1.5.8. Loi log-normale :	47
1.5.9. Test d'adéquation Kolmogorov Smirnov « K-S » :	48
1.6. Banque de données de fiabilité et taux de défaillance :	49
1.7. Objectifs de la fiabilité :	50
2. La maintenabilité :	50
3.2. Définition :	50
3.3. MTTR : « Mean Time To Repair » :	50
3.4. Taux de réparation $\mu(t)$:	50
3. Disponibilité :	51
3.1. Définition :	51
3.2. Types de disponibilité :	51
3.2.1. Disponibilité intrinsèque :	51
3.2.2. Disponibilité instantanée :	51
3.3. Amélioration de la disponibilité :	51
4. L'interaction entre les notions FMD :	52
Conclusion :	52

Chapitre III : Présentation de STPM CHIALI & la chaine PEHD

Introduction :	54
1. Présentation du groupe CHIALI :	55
1.1. Filiales du groupe CHIALI :	55
1.2. Historique du groupe CHIALI :	55
1.3. Domaines d'activité :	56
1.4. Produits fabriqués :	57
2. Filiale CHIALI TUBES :	58
2.1. Organigramme de CHIALI TUBES :	58
2.2. Relations dans la direction de production :	59
2.3. Différentes lignes de production :	59
2.4. La ligne de production des Tube PEHD :	61
3. Laboratoire contrôle qualité :	69
3.1. Méthodes de test dans laboratoire :	69
Conclusion :	71

Chapitre IV : Diagnostic & statistiques des pannes :

Introduction :	76
1. L'historique des pannes de la chaîne PEHD (ligne F) :	77
2. Méthode ABC Pareto :	79
2.1. Définition :	79
2.2. Méthode de Pareto et la multitude d'utilisation :	79
2.3. Procédure de la méthode :	80
2.4. Objectif de la méthode en maintenance :	80
2.5. Application :	81
3. Méthode d'Ishikawa :	85
3.1. La procédure de la méthode :	86
3.2. Diagramme d'ISHIKAWA :	86
3.3. Application :	86
4. Méthode AMDEC :	88
4.1. Définition :	88
4.2. Objectif de la méthode :	88
4.3. Principe d'AMDEC :	88
4.4. Procédure d'AMDEC :	89
4.5. Tableau AMDEC :	89
4.6. Application :	89
Conclusion :	100

Chapitre V : Étude de fiabilité de la chaîne de production :

Introduction :	102
1. Fiabilité :	103
1.1. Historique de l'équipement « Extrudeuse » :	103
1.2. Calcul des temps de bon fonctionnement (TBF) :	104
1.3. Estimation des fonctions réelles : $F(t_i)$ et $R(t_i)$:	105
1.4. Estimation de la fonction de répartition théorique $F(t)$:	106
1.4.1. Le logiciel MINITAB :	106
1.4.2. Le modèle le plus adapté :	108
1.4.3. Estimation de $F(t)$ par le modèle de Weibull :	112
1.4.4. Test de Kolmogorov-Smirnov :	114

1.4.5. Fonction de fiabilité théorique $R(t)$, le taux de défaillance $\lambda(t)$ et densité de probabilité $f(t)$:	115
1.4.6. Représentation graphique des fonctions et interprétations :	117
1.4.7. Calcul en fonction de la MTBF :	119
2. Maintenabilité :	120
3. Disponibilité :	121
4. Propositions des échéanciers pour une maintenance systématique :	123
Conclusion :	124
Conclusion générale :	126
Références bibliographiques :	128

Liste des figures

Chapitre I :

Figure 01 : le suivi en maintenance conditionnelle	26
Figure 02 : Types de maintenance	27
Figure 03 : Actions de la maintenance.....	28
Figure 04 : Composants d'un système	29
Figure 05 : Durées caractéristiques.....	32

Chapitre II :

Figure 01 : Fonction de défaillance $F(t)$	38
Figure 02 : Fonctions $F(t)$ et $R(t)$ associées	38
Figure 03 : Courbe en baignoire	39
Figure 04 : Composants en série	42
Figure 05 : Composants en parallèle	42
Figure 06 : Propriétés sans mémoire de la loi exponentielle.....	46
Figure 07 : Interaction des notions FMD	52

Chapitre III :

Figure 01 : Produits de STPM CHIALI.....	57
Figure 02 : Organigramme CHIALI TUBES.....	58
Figure 03 : Relation dans la direction de production.....	59
Figure 04 : tube PEHD	62
Figure 05 : les avantages du tube.....	62
Figure 06 : Granules de la matière première.....	64
Figure 07 : Composants d'une extrudeuse	64
Figure 08 : Bac de calibrage et de refroidissement.....	66

Figure 09 : Tireuse.....	67
Figure 10 : Cabestan et mise d'aluminium	70
Figure 11 : Scie automatique	70
Figure 12 : analyseur enthalpie différentielle	71
Chapitre IV :	
Figure 01 : Représentation graphique des zones A, B et C (fréquences d'arrêts).....	82
Figure 02 : Représentation graphique des zones A, B et C (temps d'arrêts)	84
Figure 03 : Forme générale du diagramme d'ISHIKAWA.....	86
Figure 04 : Diagramme d'ISHIKAWA adapté au cas d'étude.....	87
Figure 05 : Étapes principales d'une démarche AMDEC.....	89
Figure 06 : Forme générale du tableau AMDEC.....	89
Figure 07 : Schéma fonctionnel des sous-systèmes.....	90
Chapitre V :	
Figure 01 : Illustration des TBF dans une période	104
Figure 02 : Interface de logiciel MINITAB	106
Figure 03 : Résultat de comparaison entre les diagrammes	109
Figure 04 : Test Anderson-Darling et valeur P de distribution Weibull.....	110
Figure 05 : Test Anderson-Darling et valeur P de distribution exponentielle.....	110
Figure 06 : Test Anderson-Darling et valeur P de distribution normale	111
Figure 07 : Test Anderson-Darling et valeur P de distribution log-normale	111
Figure 08 : Paramètres estimés du modèle de Weibull.....	112
Figure 09 : Courbe de fonction de défaillance $F(t)$	117
Figure 10 : Courbe de fonction de fiabilité $R(t)$.....	117
Figure 11 : Courbe de fonction du taux de défaillance	118
Figure 12 : Courbe de fonction de densité de probabilité $f(t)$	118

Figure 13 : Courbe de la maintenabilité $M(t)$	121
Figure 14 : Courbe de la disponibilité instantanée $D(t)$	122

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau 01 : les niveaux de la maintenance.....	23
---	----

Chapitre III :

Tableau 01 : Différentes lignes & différents produits	60
---	----

Chapitre IV :

Tableau 01 : Historique des pannes de la chaîne du multicouche	77
--	----

Tableau 02 : Paramètres du diagnostic en fonction de fréquence d'arrêts.....	81
--	----

Tableau 03 : Paramètres du diagnostic en fonction des temps d'arrêts	83
--	----

Tableau 04 : Analyse AMDEC : sous-système : Entraînement	91
--	----

Tableau 05 : Analyse AMDEC : sous-système : Cerclage automatique	93
--	----

Tableau 06 : Analyse AMDEC : sous-système : Hydraulique	95
---	----

Tableau 07 : Analyse AMDEC : sous-système : Régulation de la vitesse	97
--	----

Tableau 08 : Critère de gravité « G »	99
---	----

Tableau 09 : Critère de fréquence « F ».....	99
--	----

Tableau 10 : Critère de détectabilité « D »	99
---	----

Chapitre V :

Tableau 01 : Historique de l'extrudeuse	103
---	-----

Tableau 02 : Temps de bon fonctionnement de l'extrudeuse.....	104
---	-----

Tableau 03 : Estimation des fonctions réelles : $F(t_i)$ et $R(t_i)$	105
--	-----

Tableau 04 : Valeurs estimées de $F(t)$ théorique par modèle de Weibull.....	113
--	-----

Tableau 05 : Calcul d'écart entre $F(t)$ et $F(t_i)$	114
--	-----

Tableau 06 : Estimation des fonctions $R(t)$, $\lambda(t)$ et $f(t)$	116
---	-----

Tableau 07 : Différentes valeurs de la maintenabilité $M(t)$ en fonction des TTR.....	120
---	-----

Tableau 08 : Différentes valeurs de la disponibilité $D(t)$ en fonction des TTR **122**

Tableau 09 : Temps systématique pour faire une intervention..... **123**

Liste des abréviations

TBF : Temps de bon fonctionnement

TTR : Temps de réparation

MTBF : Temps moyen entre défaillance

MTTR : Temps moyen de réparation

MUT : Temps moyen de disponibilité

MTTF : Temps moyen pour la première défaillance

FMD : Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité

STPM : Société de transformation du plastique et métaux.

Nomenclature

F(t) : Fonction de défaillance

R(t) : Fonction de fiabilité

f (t) : Densité de probabilité

λ (t) : Taux de défaillance

μ : Taux de réparation

F(ti) : Fonction réelle de défaillance

R(ti) : Fonction réelle de fiabilité

M(t) : Fonction de maintenabilité

D(t) : Fonction de disponibilité

E(X) : Espérance mathématique

σ : Écart type

σ^2 : Variance

$\mu(t)$: Moyenne

β : Paramètre de forme de la loi de Weibull

η : Paramètre d'échelle de la loi de Weibull

γ : Paramètre de position de la loi de Weibull

Introduction générale

Introduction générale :

La réputation d'une entreprise joue un rôle crucial en lui permettant de générer des bénéfices et de se positionner en tant que leader sur le marché. Cependant, atteindre l'excellence nécessite la fusion de plusieurs concepts à la fois : productivité, disponibilité, qualité, respect des délais, etc. Ces exigences sont étroitement liées aux équipements eux-mêmes, qui doivent produire en continu des produits de qualité tout en minimisant au maximum les pertes.

Malheureusement, au fil des heures de travail, ces équipements subissent une dégradation progressive, entraînant une réduction de leur fiabilité à chaque cycle. Cette situation conduit inévitablement à des défaillances et à des arrêts imprévus de la production. Pour pallier ce problème, une étude de fiabilité fondée sur des modèles probabilistes est essentielle. L'excellence industrielle est un objectif que toutes les entreprises cherchent à atteindre ; grâce à ce concept, les industriels peuvent, en se basant sur l'historique des équipements, anticiper leur comportement futur et intervenir avant que la défaillance ne survienne. Ces interventions peuvent être comparées à la manière dont on tend la main à une personne sur le point de tomber : elles permettent de sauver le système d'une panne dans le cadre de ce que l'on appelle «la maintenance ».

Le présent mémoire traite de l'étude de la fiabilité d'une chaîne de production chez l'entreprise STPM CHIALI, spécialisée dans la fabrication de canalisations thermoplastiques : tubes PEHD, PVC, PEBD et multicouches. L'objectif est de se concentrer sur l'étude de la fiabilité de la chaîne de production des tubes PEHD.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres, organisés comme suit :

1. **Premier chapitre** : Ce chapitre présente des généralités sur la maintenance, en abordant sa définition, ses catégories, ses objectifs, ses niveaux, ainsi que la relation entre la maintenance et la fiabilité, en soulignant l'influence de la première sur la seconde.
2. **Deuxième chapitre** : Ce chapitre rappelle le concept FMD (fiabilité, maintenabilité, disponibilité), puis présente divers modèles probabilistes qui permettent d'estimer la fiabilité et l'état des équipements. Il couvre des lois discrètes (loi uniforme, loi binomiale, loi de Poisson...) et des lois continues (loi exponentielle, loi normale, loi log-normale, loi de Weibull), ainsi que certains tests d'adéquation et des banques de données en fiabilité.

3. **Troisième chapitre** : Ce chapitre est consacré à la présentation du groupe STPM CHIALI, de son domaine d'activité, de ses produits fabriqués, ainsi que de ses différentes filiales. Une attention particulière est portée à CHIALI TUBES, avec une présentation détaillée de ses lignes de production, en se concentrant sur celle des tubes PEHD qui fait l'objet de cette étude, de ses équipements et du processus de fabrication en général.
4. **Quatrième chapitre** : Ce chapitre présente un diagnostic des pannes de la chaîne de production des tubes PEHD, en utilisant des méthodes statistiques pour subdiviser les secteurs par priorité. D'autres méthodes de diagnostic sont également utilisées pour choisir une politique de maintenance adaptée.
5. **Cinquième chapitre** : Ce dernier chapitre est dédié au calcul de la fiabilité de la chaîne de production en utilisant un modèle probabiliste approprié. Il inclut l'estimation des paramètres et l'évaluation de la fiabilité. Des calculs de maintenabilité et de disponibilité sont également réalisés dans cette section.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Introduction :

La maintenance constitue un élément fondamental pour assurer la pérennité des entreprises industrielles. Grâce à ses fonctions de soin et de réparation des équipements, elle permet à la performance globale du système de production d'atteindre des niveaux élevés, garantissant ainsi une continuité du service. Il est important de noter que les concepts de « maintenance » et de « fiabilité » des équipements sont étroitement liés.

D'une part, la maintenance joue un rôle crucial dans la détection et la prévention des défaillances avant qu'elles ne surviennent. En effet, un entretien régulier permet d'identifier les pièces usées ou défectueuses et de les remplacer avant qu'elles ne causent des pannes, contribuant ainsi à la préservation de la fiabilité des équipements en réduisant les risques de défaillance et d'arrêts non planifiés.

D'autre part, la fiabilité peut également impacter les besoins en maintenance. Un équipement conçu pour être plus fiable nécessitera moins d'interventions de maintenance pour maintenir ses performances. Cela permet de réduire les coûts associés à la maintenance tout en améliorant l'efficacité du processus de production.

En somme, la maintenance et la fiabilité sont des concepts complémentaires qui, ensemble, optimisent la performance des équipements industriels, prolongeant leur durée de vie et améliorant leur efficacité.

1. Historique de la maintenance :

Dans le secteur industriel, l'entretien était principalement axé sur la surveillance des équipements et les réparations après panne jusqu'aux années 1800. À cette époque, la conception des équipements était perçue comme fiable et les pannes étaient considérées comme impossibles. Ironiquement, cette perception s'est avérée erronée, car les conceptions de l'époque ont montré des défaillances imprévues.

Au 20^e siècle, en raison des dommages considérables causés par des dysfonctionnements d'équipements dangereux, les organisations nationales et les entreprises ont commencé à mettre en place des contrôles rigoureux et une surveillance systématique.

Durant la période de 1940 à 1945, une nouvelle méthodologie, appelée maintenance préventive systématique, a émergé. Bien qu'elle ne fût pas jugée optimale, elle consistait à programmer les interventions de maintenance des équipements et à remplacer les pièces susceptibles de se détériorer au cours du processus de maintenance. Cette approche a été largement adoptée et est devenue la norme en matière de maintenance.

Entre 1960 et 1970, les principes de fiabilité et de maintenabilité ont pris forme. La maintenance de cette période était fondée sur l'historique des pannes et sur des modèles statistiques, ce qui permettait d'optimiser les coûts pour les entreprises. La maintenance est ainsi devenue une fonction stratégique, surpassant la production en termes de dépenses et d'investissements. L'introduction de la maintenance conditionnelle a marqué un tournant en mettant l'accent sur le fait que les interventions de maintenance devaient être effectuées uniquement après l'analyse des équipements et la détection des pannes. Cette approche était jugée plus efficace que la maintenance systématique, qui pouvait entraîner des anomalies inutiles.

Depuis les années 1970, la maintenance productive totale (TPM) est devenue une approche prépondérante. Elle se concentre sur l'optimisation des équipements par l'implication des opérateurs dans les processus de maintenance, notamment au niveau 01. De plus, la participation des membres des cercles de maintenance a été encouragée pour améliorer la qualité des interventions.

Dans les années 2000, les avancées informatiques ont donné naissance à de nouvelles pratiques de maintenance, telles que la gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO), la maintenance assistée par ordinateur (MAO), et la télémaintenance pour la surveillance à distance des équipements. C'est également à cette époque que la maintenance 4.0 a vu le jour, avec l'intégration de l'intelligence artificielle dans diverses applications de maintenance. [1]

2. Terminologies et définitions:

Selon la norme [2] de l'AFNOR :

2.1. Bien :

Un élément, un composant, un mécanisme, un sous-système, une unité fonctionnelle, un équipement ou un système est une entité qui peut être décrite et considérée de manière indépendante dans un contexte spécifique.

2.2. Fonction requise :

La fonction requise désigne l'ensemble des fonctions ou la totalité des fonctions d'un bien qui sont considérées comme nécessaires pour satisfaire à une exigence spécifique. Elle représente les performances ou les tâches minimales qu'un bien doit accomplir pour répondre aux attentes ou aux besoins définis dans un contexte particulier.

2.3. Panne :

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 externe.

- **Panne cachée :** Panne existante qui n'est pas devenue apparente.
- **Panne partielle :** Panne caractérisée par le fait que le bien ne peut accomplir que quelques-unes des fonctions requises mais pas toutes.
- **Panne latente :** panne existante, mais qui n'a pas encore été détectée.

2.4. Maintenance :

La maintenance désigne l'ensemble des actions techniques, administratives et de gestion réalisée tout au long du cycle de vie d'un bien, visant à le maintenir ou à le rétablir dans un état permettant d'accomplir la fonction requise.

2.4.1. Management de la maintenance:

Il s'agit de l'ensemble des activités menées par les instances de direction pour définir les exigences, les objectifs, la stratégie et les responsabilités en matière de maintenance, et pour les mettre en œuvre à travers des moyens tels que la planification, la gestion, le contrôle de la maintenance, ainsi que l'amélioration des activités de maintenance et la gestion des aspects économiques.

2.4.2. Objectifs la de maintenance :

Buts fixés et acceptés pour les activités de maintenance.

2.4.3. Stratégie de la maintenance :

Méthode de gestion utilisée pour atteindre les buts de maintenance.

2.4.4. Plan de maintenance :

Le plan de maintenance est un ensemble structuré et documenté de tâches, incluant les activités, les instructions, les ressources et la durée nécessaires pour effectuer la maintenance. [2]

3. Niveaux de la maintenance :

Puisque les tâches réalisées lors d'une opération de maintenance varient en fonction de leur difficulté et de leurs exigences techniques, l'industrie distingue généralement cinq niveaux principaux de maintenance. (Voir - Tableau 01 -) :

Tableau 01 : Les niveaux de maintenance [3]

Niveau :	Signification:	Exemple :
Niveau 01	- La maintenance de base se caractérise par un accès direct à l'équipement et par la réalisation d'opérations simples, effectuées à l'aide de dispositifs d'assistance, de ressources matérielles ou de manuels d'instructions..	<u>Maintenance preventive :</u> - Graissage et purge (Quotidien) - Contrôle d'unité d'usage et d'état. <u>Maintenance corrective :</u> - Changements des pièces ou composants simples, faciles et accessibles.
Niveau 02	- Les opérations de maintenance exigent des procédures élémentaires et/ou l'emploi d'équipements de soutien, exécutables par un personnel certifié au niveau requis.	<u>Maintenance preventive :</u> - Graissage (Hebdomadaires, mensuel) - Supervision en temps réel des paramètres opérationnels de l'équipement en vue d'optimiser la maintenance prédictive. <u>Maintenance corrective :</u> - Remplacement standardisé des pièces consommables.

Niveau 03	- L'exécution de cette tâche nécessite un technicien qualifié, apte à appliquer des procédures complexes et/ou à utiliser les équipements spécifiques mentionnés dans les instructions de maintenance.	<u>Maintenance préventive :</u> - Visite des équipements complexes. <u>Maintenance corrective :</u> - Réparation des fissures et des fuites.
Niveau 04	- L'exécution d'une tâche nécessitant des techniques et technologies spécialisées requiert l'intervention d'un technicien qualifié ou d'une équipe d'experts, ainsi que l'application rigoureuse de l'ensemble des directives de maintenance.	<u>Maintenance préventive :</u> - Révisions en atelier des équipements tels que moteurs, pompes, compresseurs, etc. <u>Maintenance corrective :</u> - Remplacement des composants non consommables défectueux sur les équipements révisés.
Niveau 05	- Les opérations de reconstruction et de rénovation exigent la maîtrise des techniques, des procédés et/ou de l'utilisation d'équipements industriels de soutien par une équipe spécialisée.	<u>Maintenance préventive :</u> - Révision complète après démontage intégral de la machine. <u>Maintenance corrective :</u> - Modification et remise à niveau des machines

4. Types de la maintenance :

La maintenance se divise en deux grandes catégories : la maintenance préventive et la maintenance corrective. Chacune de ces catégories comprend plusieurs sous-types dont la compréhension est essentielle dans le domaine d'intervention.

4.1. Maintenance corrective :

La maintenance corrective se définit comme une intervention réalisée à la suite d'une défaillance d'équipement. Selon la norme AFNOR, il s'agit de « une maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise » [2]. La mise en œuvre de la maintenance corrective nécessite la disponibilité de ressources humaines et matérielles compétentes, ainsi que de pièces de rechange et d'outillages sur site. En raison de son caractère aléatoire, elle est particulièrement adaptée aux équipements pour lesquels :

- Les conséquences d'une défaillance ne présentent pas de risque majeur ;
- Le processus de réparation est simple, rapide et demande un temps d'intervention réduit ;
- Les coûts d'investissement restent faibles [6].

- Ce type de maintenance se subdivise en :

4.1.1. Maintenance palliative :

L'intervention décrite ici repose sur les principes du dépannage. Celui-ci consiste à identifier et corriger les anomalies de performance d'un équipement, dans le but de le rétablir à un niveau de fonctionnement acceptable. Il est important de souligner que cette remise en service est généralement temporaire et peut ne pas restituer les performances optimales. Selon l'AFNOR, le dépannage est défini comme : « Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise, appelée couramment dépannage » [2].

Ce type d'intervention est généralement suivi par des actions curatives destinées à restaurer définitivement les capacités nominales de l'équipement.

4.1.2. Maintenance curative:

Bien dans un état spécifié pour lui permettre d'accomplir une fonction. Contrairement au type précédent, la maintenance curative vise à un changement de manière décisive et définitive aux défaillances, selon l'AFNOR c'est : « Une action de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir une fonction requise. Le résultat des actions réalisées doit présenter un caractère permanent ». [2]

4.2. Maintenance préventive:

À l'inverse de la maintenance corrective, la maintenance préventive a pour objectif d'éviter l'apparition de défaillances grâce à des interventions planifiées et ciblées. Selon la définition de la norme [5], il s'agit d'une « maintenance exercée à des intervalles

prédéterminés ou selon des critères prescrits, et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement du bien ».

La maintenance préventive se décline en plusieurs formes, que nous détaillerons ci-après.

4.2.1. Maintenance systématique :

Lorsqu'on se réfère à la maintenance, le terme "préventif systématique" est couramment utilisé. Ce type de maintenance est prédéterminé et se produit à des intervalles réguliers, qui peuvent être déterminés en fonction de divers facteurs tels que le temps passé à opérer, la distance parcourue et d'autres critères pertinents. « Maintenance préventive exécutée à intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien ». [5]

4.2.2. Maintenance conditionnelle :

Certaines formes de maintenance préventive peuvent être jugées inutiles si elles ne sont pas correctement contrôlées. Pour résoudre ce problème, des formes alternatives de maintenance préventive ont apparues : la maintenance conditionnelle et la maintenance prédictive. Ces méthodes sont basées sur la surveillance en temps réel de l'état des actifs pour s'assurer que la maintenance n'est effectuée que lorsque cela est nécessaire. L'association française de la normalisation communique la maintenance préventive conditionnelle comme une : « maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent ». [5] Généralement, l'inspection focalise sur un ou plusieurs paramètres à contrôler, par exemple : la vitesse, l'amplitude d'un courant, les vibrations...etc. aujourd'hui et avec l'évolution de la technologie des capteurs, la plupart des systèmes sont contrôlés de façon automatique et le déclenchement ne s'atteindra que si les seuils de limites sont dépassés.

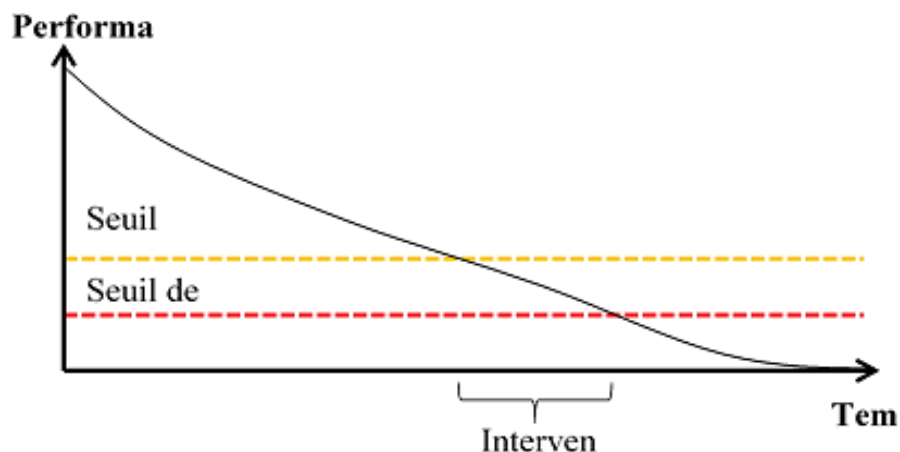


Figure 1: Le suivi en maintenance conditionnelle [6]

4.2.3. Maintenance prévisionnelle :

Également appelée « maintenance prédictive », l'AFNOR la définit comme une « maintenance conditionnelle exécutée suite à une prévision obtenue grâce à une analyse répétée ou à des caractéristiques connues et à une évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien ».

La maintenance prévisionnelle repose sur la surveillance continue de l'état réel des machines, de leur efficacité opérationnelle et d'indicateurs critiques, afin de réduire les pannes imprévues et d'optimiser les intervalles entre les réparations [7]. Elle constitue un levier essentiel pour améliorer la fiabilité des systèmes, équipements et installations [8].

Toutefois, le principal défi réside dans la capacité à prédire avec précision les défaillances, condition indispensable pour limiter les pertes opérationnelles [9].

Le schéma ci-après récapitule les différents types de maintenance :

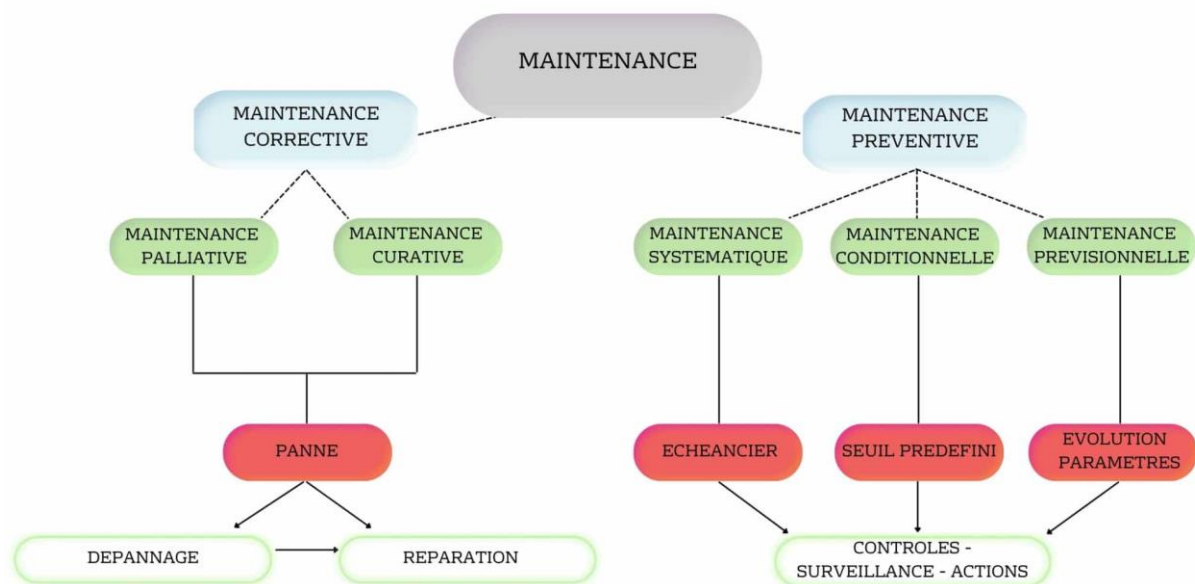


Figure 2:Types de maintenance [10]

5. Actions de la maintenance :

La maintenance ne se limite pas aux interventions techniques telles que le nettoyage, le remplacement ou le serrage ; elle intègre également des aspects organisationnels et administratifs, notamment la gestion des pièces de rechange pour assurer des performances optimales. Les actions de maintenance peuvent être globalement classées en deux types :

5.1 Actions techniques :

Elle comprend l'ensemble des interventions techniques réalisées directement sur l'équipement, telles que les remplacements standards, les opérations de lubrification et autres actions similaires., tel que :

- Les réglages
- Les diagnostics et la localisation des anomalies
- Graissage et nettoyage
- Inspections, contrôles, vérifications
- Arrangement et ordonnancement du site de travail

5.2. Actions administratives :

Il s'agit de l'ensemble des activités réalisées pour organiser et gérer la maintenance, par exemple :

- Gestion de stock
- Approvisionnement
- Méthodes et études
- Planifications
- Création de l'historique des biens.
- Ordonnancement des tâches
- Organiser des formations

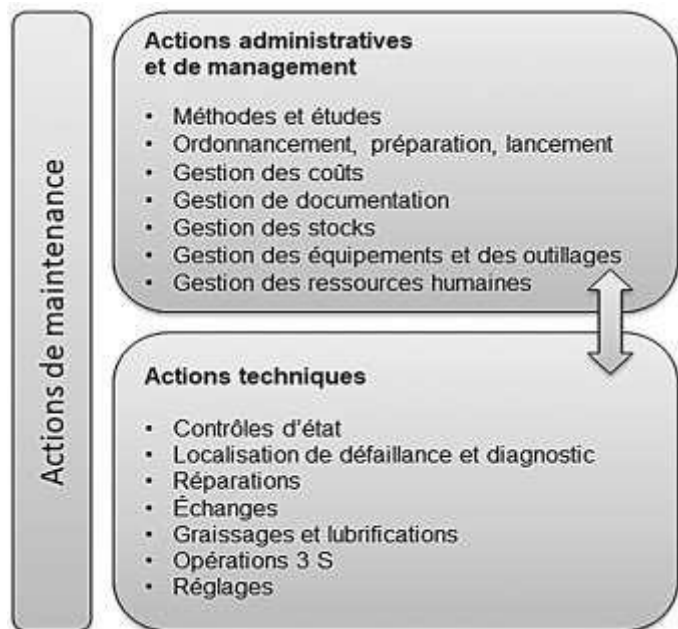


Figure 3 : actions de la maintenance [11]

En décomposant l'ensemble en processus, il apparaît clairement que les actions administratives relèvent principalement des processus de gestion et de support, tandis que les actions d'intervention sont directement liées aux processus de mise en œuvre.

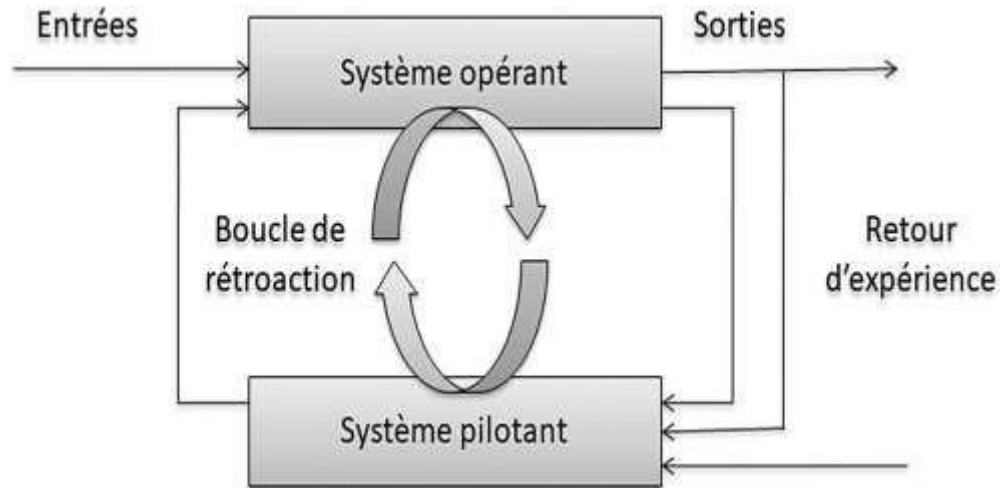


Figure 04 : composants d'un système [11]

En adoptant une approche systémique, la maintenance peut être conçue comme un système global intégrant deux composantes principales : la partie opérationnelle, chargée des actions techniques, et la partie pilotage, responsable de l'administration et de la gestion. Ce dispositif est complété par un système de rétroaction, reposant sur des indicateurs et des tableaux de bord, permettant de fournir des informations essentielles à l'amélioration continue. [11]

6. Les enjeux de la maintenance :

6.1. Enjeux économiques :

Des pratiques opérationnelles insuffisantes ou une maintenance inappropriée peuvent entraîner des pertes et des dommages importants, impactant non seulement les équipements, mais également leur environnement et l'économie de l'entreprise. Un entretien négligé ou une supervision déficiente peut réduire la disponibilité des équipements, affecter le taux de production ainsi que la qualité des produits, compromettant ainsi la réputation de la marque sur le marché.

6.2. Enjeux technologiques :

La maintenance constitue également un levier d'amélioration des compétences humaines et participe à l'évolution technologique. Par exemple, des opérations telles que le démontage, le remontage ou le remplacement de composants permettent non seulement d'améliorer l'état et la conception des équipements, mais aussi de développer la méthodologie et le savoir-faire des intervenants. Ainsi, « la maintenance est une excellente école de la technologie » [11].

6.3. Enjeux sociaux :

Assurer le bon fonctionnement des biens par la maintenance est essentiel pour garantir la sécurité et protéger l'environnement, contribuant ainsi à la réduction des risques dans de nombreux secteurs. Par ailleurs, les besoins en maintenance génèrent de nouvelles opportunités d'emploi et favorisent une valorisation optimale des compétences, participant ainsi à la réduction du chômage [1].

7. Les indicateurs de performance :

Le service de maintenance a instauré des mesures visant à surveiller et à améliorer l'état des équipements ainsi que leur efficacité. Ces mesures, présentées sous forme d'indicateurs de performance, peuvent être classées en deux grandes catégories, selon [4] :

7.1. Mesure de disponibilité d'un bien :

- **Taux d'engagement du bien :**

C'est l'indicateur qui donne une estimation d'engagement du bien à la production :

$$\frac{\textit{Temps requis}}{\textit{Temps total}}$$

- **Indicateur de disponibilité opérationnelle :**

Un bon indice de savoir l'état de disponibilité de l'équipement, peut se calculer par :

$$\frac{\textit{Temps effectif de disponibilité}}{\textit{Temps requis}}$$

Ou bien :

$$\frac{\textit{MTBF}}{\textit{MTTR} + \textit{MTBF}}$$

- **Taux d'utilisation d'un bien :**

Aussi dit « Taux d'exploitation du bien » : Indicateur permettant de connaître le taux d'utilisation d'équipement :

$$\frac{\text{Temps de fonctionnement}}{\text{Temps effectif de disponibilité}}$$

- **Indice de comparaison des performances d'exploitation :**

Dédié pour la mesure du niveau d'exploitation d'un équipement :

$$\frac{\text{Temps de bon fonctionnement}}{\text{Temps requis}}$$

7.2. Mesure d'indisponibilité pour maintenance :

- **Pénalité d'indisponibilité :**

Puisque l'indisponibilité d'un équipement cause des pertes financières dus au pénalité des retards, on la mesure comme suit :

$$\frac{\text{Temps propre d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps requis}}$$

- **Indicateurs des effets externes :**

Il nous permet de savoir les causes externes qui influent l'indisponibilité pour maintenance :

$$\frac{\text{Temps propre d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps effectif d'indisponibilité}}$$

- **Indicateur d'efficacité globale :**

Mesure la charge du personnel de maintenance relativement à des prévisions de fonctionnement ou production :

$$\frac{\text{Temps propre d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps de fonctionnement ou quantité de production}}$$

- **MTBF « Mean Time Between Failure » :**

Signifie le temps de bon fonctionnement entre deux pannes, s'écrit :

$$MTBF = \sum \frac{\text{Temps de bon fonctionnement}}{\text{Nombre de défaillance}}$$

- **MTTR « Mean Time To Repair » :**

C'est le temps moyen de réparation d'un bien :

$$MTTR = \sum \frac{\text{Temps des activités de maintenance corrective}}{\text{Nombre de défaillance}}$$

- **MUT (Mean Up Time) :**

Après une réparation, *MTTF* et *MUT* sont presque équivalents en supposant que le système revient à son état d'origine. Essentiellement, cela signifie que *MUT* mesure le temps moyen entre les pannes suite à une réparation.

- **MDT (Mean Down Time) :**

En additionnant les temps de réparation, de détection et de mise en service, vous obtenez le temps d'arrêt moyen. La détection du problème et la résolution du problème sont parfois considérées comme insignifiantes, ce qui conduit à une équation qui ressemble à ceci : $MDT \approx MTTR$.

Dans la **figure -05-** on aura les différents temps vécus par un bien entre deux pannes :

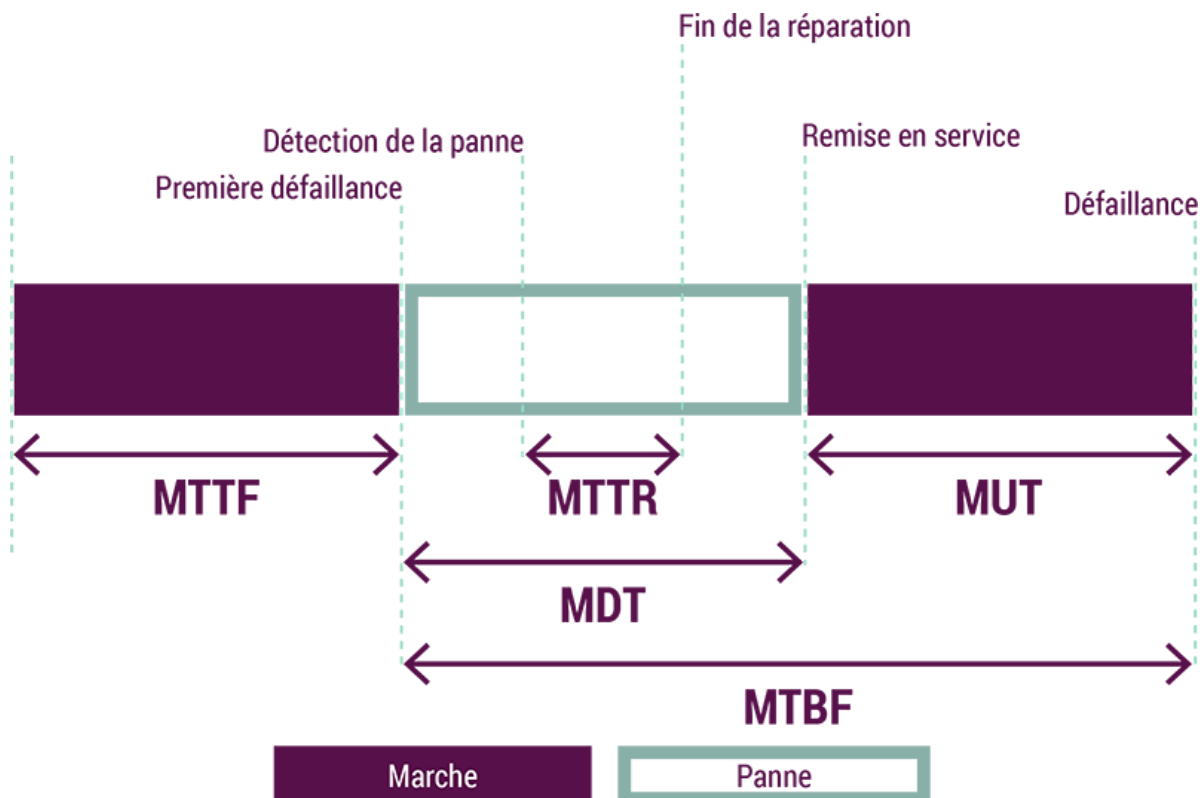


Figure 05 : Durées caractéristiques

8. Objectifs de la maintenance:

Maintenir un site de production impose de poursuivre deux objectifs principaux. Le premier est de garantir la disponibilité opérationnelle de l'ensemble des équipements, machines et outils afin d'assurer un fonctionnement optimal. Le second est d'ordre économique : il vise à réduire les coûts et à maîtriser le budget alloué aux services de maintenance grâce à des actions d'entretien ciblées.

En complément, plusieurs objectifs secondaires peuvent être identifiés :

- **Sortir du cycle d'entretien constant** : éviter l'aggravation des dysfonctionnements qui entraînent une augmentation continue des pannes.
- **Respect des réglementations** : se conformer aux exigences légales et industrielles en vigueur.
- **Sécurité** : garantir la protection des équipements ainsi que la sécurité du personnel de maintenance.
- **Qualité** : viser l'amélioration continue, notamment à travers la certification ISO 9000 ou la reconnaissance de clients majeurs.
- **Environnement** : s'engager activement dans la protection de l'environnement, notamment par l'obtention de la certification ISO 14000 [12].

9. Rôle de la maintenance :

Le service maintenance de l'entreprise est chargé de mettre en œuvre la politique de maintenance définie par la direction. Cette politique vise à optimiser la productivité des systèmes de production afin d'atteindre le meilleur rendement possible et de maximiser l'efficacité globale.

L'entretien des équipements nécessite une hiérarchisation en fonction de leur importance stratégique. Ainsi, le service maintenance doit élaborer des stratégies adaptées aux différents scénarios, en cohérence avec la politique générale de l'entreprise.

Il est essentiel que la fonction maintenance précise ses prévisions, qui se déclinent comme suit :

- **Prévisions à long terme** : elles concernent principalement les investissements ou projets majeurs inscrits dans les orientations stratégiques de l'organisation.

- **Prévisions à moyen terme** : les travaux de maintenance doivent être planifiés avec rigueur afin de ne pas perturber les programmes de production ; l'équipe doit anticiper ses interventions et intégrer les besoins de surveillance des matériaux dans la planification.
- **Prévisions à court terme** : allant de quelques heures à une semaine, elles nécessitent également une préparation minutieuse pour limiter au maximum l'impact sur la production [13].

Conclusion :

Après un certain nombre de cycles de fonctionnement, la dégradation des composants d'un équipement devient inévitable, entraînant soit des dysfonctionnements, soit un arrêt total. Pour maintenir l'équipement sous contrôle et assurer son bon état de fonctionnement, il est alors nécessaire d'intervenir: c'est le rôle de la maintenance.

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les notions et termes clés liés à la maintenance, en lien direct avec l'état des équipements, leur rendement et leur fiabilité.

Chapitre II :
F.M.D
(Fiabilité, Maintenabilité,
Disponibilité)

Introduction :

Le concept de FMD, qui regroupe la Fiabilité, la Maintenabilité et la Disponibilité, est essentiel dans la conception, l'évaluation et la gestion de divers systèmes, qu'ils soient mécaniques, électroniques, logiciels ou autres.

L'association de ces trois notions permet d'évaluer l'efficacité globale d'un système et de prendre des décisions éclairées concernant son entretien, sa réparation et son amélioration.

- **La fiabilité** représente la probabilité qu'un système fonctionne sans défaillance pendant une durée déterminée. Elle repose sur la réduction des risques d'erreur, la robustesse des composants critiques, leur capacité à supporter les contraintes environnementales, ainsi que leur aptitude à fonctionner de manière continue.
- **La maintenabilité** désigne la capacité d'un système à être entretenu et réparé efficacement. Elle nécessite une conception facilitant l'accès aux composants, des procédures de maintenance claires, des outils de diagnostic adaptés et des temps d'intervention réduits.
- **La disponibilité** correspond à la proportion du temps durant laquelle le système est opérationnel et apte à remplir sa fonction. Elle dépend de la fiabilité du système, de sa maintenabilité, ainsi que de l'organisation des ressources de maintenance.

Le concept de FMD est donc fondamental pour garantir la performance, la durabilité, la rentabilité des systèmes ainsi que la satisfaction des utilisateurs.

Dans la suite de ce chapitre, nous détaillerons chacune de ces notions, les méthodes d'évaluation associées et les lois mathématiques qui permettent leur calcul.

1. La fiabilité d'un système:

Un système est un ensemble de composants interdépendants, conçu pour accomplir une tâche spécifique dans des conditions et des délais donnés. Pour définir précisément un système, il est essentiel d'en identifier les caractéristiques principales: sa fonction, sa structure, ses conditions d'exploitation ainsi que l'environnement dans lequel il évolue. [15].

1.1. Définition de la fiabilité:

La fiabilité est la capacité d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation spécifiées et sur une période de temps déterminée. [16]

Selon [17], la fiabilité se définit comme l'aptitude d'une entité à réaliser les opérations prévues dans un délai donné et dans des circonstances particulières. Elle est caractérisée par la probabilité $R(t)$ que l'unité E exécute correctement ses fonctions durant l'intervalle de temps $[0 : t]$, en tenant compte du fait que l'unité n'est pas inactive au début de la période.

1.2. Types de fiabilité :

1.2.1. Fiabilité opérationnelle :

Dans ce type d'évaluation de la fiabilité, la procédure consiste à analyser les performances d'un ensemble de dispositifs identiques en conditions réelles d'exploitation. Cette analyse, basée sur le retour d'expérience, repose sur une approche statistique. Lorsque le nombre d'appareils observés est suffisamment important, la probabilité moyenne obtenue devient significative.

Son expression est :

$$R(t) = \frac{\text{Nombre moyen d'entités non défailtantes à l'instant "t"}}{\text{Nombre total d'entités } [0, t]}$$

Comme condition initiale : à l'instant « $t = 0$ » le système n'a pas encore subi la défaillance. [21]

1.2.2. Fiabilité prévisionnelle :

Ce type de fiabilité concerne l'estimation de la fiabilité future d'un système, en se basant sur sa conception et sa fiabilité en exploitation. Les paramètres clés utilisés sont « l'évaluation du taux de défaillance probable » et « le temps moyen sans défaillance ». [21]

Mathématiquement elle s'écrit :

$$(t) = \text{Probabilité (système non défailtant sur } [0, t])$$

1.3. Les paramètres nécessaires de la fiabilité :

1.3.1. Les fonctions $F(t)$ et $R(t)$:

$F(t)$ qu'elle a prend cette lettre du nom anglais « *Failure* », est la fonction qui désigne la probabilité qu'un élément choisi d'une population au hasard a l'instant t soit défaillant :

$$F(T) = P(T \leq t); t \geq 0 \quad (II.1)$$

La figure ci-dessous montre la courbe de $F(t)$:

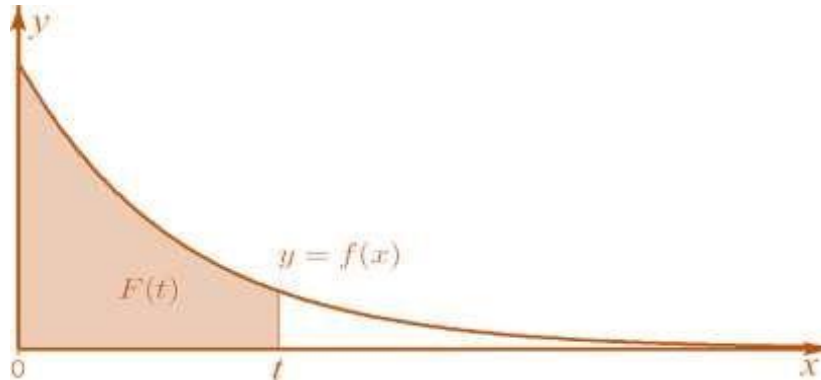


Figure 01 : Fonction de défaillance $F(t)$

La fonction $R(t)$ à son tour, prends ce symbole du nom anglais « *Reliability* », c'est le complémentaire de la fonction $F(t)$: la probabilité d'un élément choisi aléatoirement d'être en bon état et fiable avant l'instant t . [18]

$$F(t) + R(t) = 1 \Rightarrow R(t) = 1 - F(t) \quad (II.2)$$

La figure suivante montre les deux fonctions simultanément sur le même graphe :

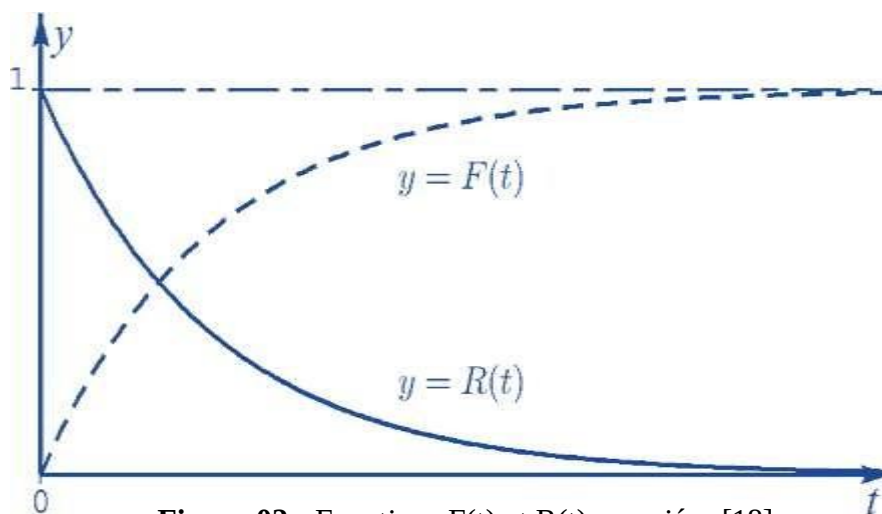


Figure 02 : Fonctions $F(t)$ et $R(t)$ associées [18]

Le taux d'avarie moyen dans $[t, t+\Delta t]$ s'écrit :

$$\frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (II.3)$$

1.3.2. Taux de défaillance instantané $\lambda(t)$:

Le taux de défaillance instantané $\lambda(t)$ est décrit par :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \right) \quad (II.4)$$

Le terme $\lambda(t) \times \Delta t$ mesure la probabilité de défaillance d'un élément sur l'intervalle $[t, t+\Delta t]$ avec une condition que cet élément a fonctionné correctement jusqu'à t . [18]

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \times \frac{1}{R(t)} \quad (II.5)$$

$$= \frac{dF(t)}{dt} \times \frac{1}{R(t)} \quad (II.6)$$

À partir (3), on a l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dR(t)}{dt} + \lambda(t) \cdot R(t) = 0 \quad (II.7)$$

Sa résolution permet de calculer la fiabilité en fonction du $\lambda(t)$, elle est de la forme :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} \quad \Rightarrow \quad F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$$

La fonction du taux de défaillance $\lambda(t)$ suit une courbe dite courbe en baignoire (voir figure) :

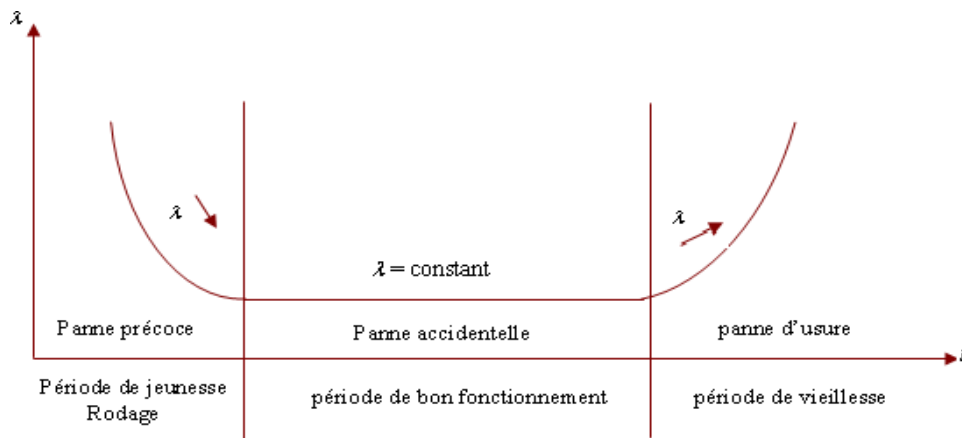


Figure 03 : Courbe en baignoire [15]

Elle caractérise trois périodes principales :

- **Période de jeunesse ou de rodage** : également appelée « période de mortalité infantile » [19].
Durant cette phase, le taux de défaillance diminue rapidement. Ce phénomène s'explique par l'élimination des défauts de fabrication, dits « défauts de jeunesse ». Un rodage est essentiel pour réduire ce taux jusqu'à atteindre le régime stable de la période suivante.
- **Période de bon fonctionnement** : souvent désignée comme « période de maturité » ou « période de vie utile » [19]. Ici, le taux de défaillance est faible et relativement constant ; les composants montrent leur résistance après avoir surmonté les défauts initiaux.
- **Période de vieillissement** : caractérisée par une augmentation notable du taux de défaillance, liée au vieillissement et à l'usure progressive des composants.

On peut également calculer λ physiquement comme :

$$\lambda = \frac{\text{Nombre total de défaillance pendant le service}}{\text{Temps de bon fonctionnement}}$$

1.3.3. Fonction de densité de probabilité $f(t)$:

À un instant t , la densité de probabilité de défaillance peut être calculée par la dérivée de la fonction de répartition $F(t)$ [18] :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (II.8)$$

Ou bien :

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (II.9)$$

1.3.4. MTBF « temps de bon fonctionnement » :

Dans le chapitre précédent on a mentionné l'expression de MTBF physiquement, c'est notable qu'elle est l'inverse de λ .

On peut également le déduire mathématiquement par :

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (II.10)$$

Ou bien :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} ; \lambda : Cte \quad (II.11)$$

Dans certaines sources il est appelé : « indicateur de fiabilité », car il donne une idée sur le comportement d'un dispositif. [25]

1.3.5. MTTF: « Mean Time To Failure »:

Le temps moyen de fonctionnement avant l'apparition de la première panne :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (II.12)$$

1.3.6. MUT : « Mean Up Time » :

C'est la mesure des moyens temps de bon fonctionnement après la réparation :

$$MTBF = MTTR + MUT \quad (II.13)$$

1.4. Disposition des systèmes :

Avant d'évaluer la fiabilité d'un système électronique, mécanique ou autre, il est essentiel de connaître la loi de fiabilité de chacun de ses composants. Il est également nécessaire de comprendre comment ces composants sont agencés entre eux.

- **Système avec « n » composants en série :**

Rs la fiabilité totale des n composant en série se calcule par le produit des fiabilités de chaque composant :

$$R_S = R_A \times R_B \times R_C \times \dots \times R_n$$

$$RS = e^{-\lambda_A t} \times e^{-\lambda_B t} \times e^{-\lambda_C t} \times \dots \times e^{-\lambda_n t} ; \lambda: cte \quad (II.14)$$

MTBF se calcule par :

$$MTBF_S = \frac{1}{\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \dots + \lambda_n} \quad (II.15)$$

Les 'n' composants ont la même valeur de fiabilité :

$$R_s = R_n$$

Et si les composants sont identiques :

$$R_S = e^{-\lambda_n t} \quad \text{Et} \quad MTBF_S = \frac{1}{n \times \lambda}$$

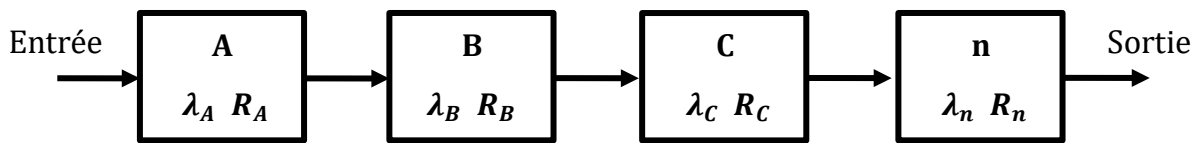


Figure 04 : Composants en série [18]

• **Système avec « n » composants en parallèle :**

Un système en parallèle est jugé un système plus fiable que ceci en série : le système parallèle ne peut tomber en panne si les n composants tombent en panne simultanément.

Sachant que : F_i et R_i sont deux fonctions complémentaires. [18]

Pour 'n' composants en parallèle :

$$R_P = 1 - (1 - R)^n \quad (II.16)$$

Si λ est constant :

$$R_P = 1 - (1 - R_A)(1 - R_B) = R_A + R_B - R_A \cdot R_B = e^{-\lambda_A t} + e^{-\lambda_B t} + e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t}$$

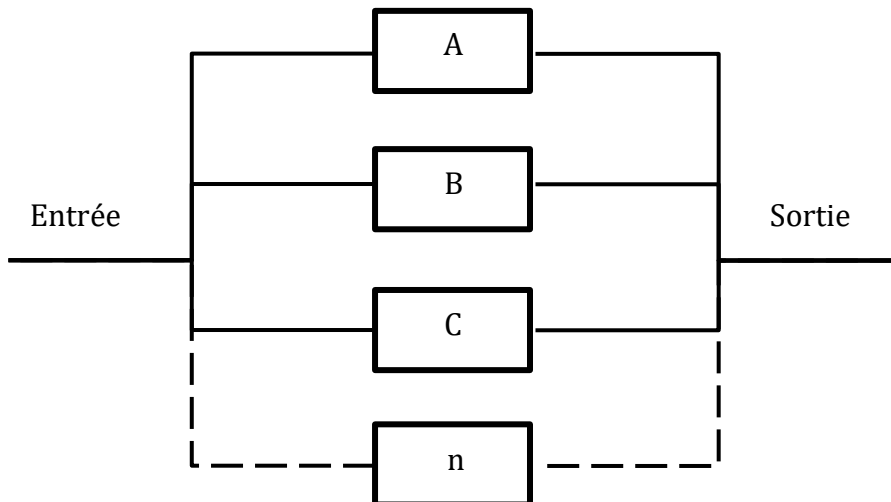


Figure 05 : Composants en parallèle [18]

1.5. Lois de probabilités en fiabilité :

Les lois de probabilité sont des outils incontournables lors du calcul de la fiabilité, par leurs propriétés de caractériser une distribution d'une variable aléatoire discrète ou continue. Ces sont subdivisées en deux grandes catégories :

- **Lois discrètes :**

Une loi discrète est une loi définit sur $\mathbb{N}$, l'ensemble des valeurs naturelles.

Les lois discrètes sont plusieurs, on mentionne :

- Loi uniforme
- Loi binomiale
- Loi de poisson
- Loi de Bernoulli
- Loi de survie

1.5.1. Loi uniforme :

L'approche bayésienne pour modéliser les avis d'experts dans un contexte donné repose sur une loi particulière. Cette loi utilise la densité de probabilité et la fonction de fiabilité associées à une distribution uniforme sur l'intervalle $[0, a]$. Les valeurs correspondantes peuvent être déterminées à l'aide des formules suivantes :

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{a} & \text{si: } 0 \leq t \leq a \\ 0 & \text{si: } t > 0 \end{cases} \quad (II. 17)$$

En générale, la distribution de probabilité d'une loi uniforme sur $[a, b]$ s'écrit [20]:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{si: } 0 \leq t \leq a \\ 0 & \text{si: } t > 0 \end{cases} \quad (II. 18)$$

1.5.2. Loi binomiale :

Pour une défaillance D, la probabilité de son apparition P : la probabilité de survenir K défaillance en N essais [21];[18].

$$P(x = k) = C_k^n P^k (1 - P)^{n-k} \quad (II. 19)$$

$$\text{Avec : } C_k^n = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

1.5.3. Loi de poisson :

Si une variable aléatoire x peut être définie sur le domaine $\mathbb{N}$ et prend des valeurs $\{0, 1, 2, 3 \dots n\}$ on dit qu'elle suit une loi de poisson. La probabilité pour que x soit égal à k est :

$$P(x = n) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^n}{n!} \quad (\text{II. 20})$$

λ : Paramètre de la loi

1.5.3.1 Relation de poisson :

La probabilité d'occurrence d'un événement est conditionnée par : la population étudiée est grande avec un nombre d'événement petit : Loi de poisson est dédiée à ce genre de phénomène rare. D'où la probabilité P est très faible ($P < 0.05$).

Elle est considérée comme limite de la loi binomiale dans certains cas.

Pour avoir un nombre « n » pannes dans un instant t [18] :

$$P(x = n) = e^{-\lambda t} \cdot \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (\text{II. 21})$$

Avec : $E = \lambda t$

$$\sigma = \sqrt{\lambda t}$$

1.5.4. Loi de Bernoulli :

Dans un univers constitué de deux durées $\{E, S\}$: S pour succès, E pour échec, on cherche pour une variable aléatoire discrète, « nombre de succès » au cours d'une épreuve :

Quand : S réalisée $X = 1$

E réalisée $X = 0$

La formule de la fonction de fiabilité est notée [18] :

$$\begin{aligned} P(X = 0) &= q \\ (X = 1) &= p \\ (p + q) &= 1 \end{aligned} \quad (\text{II. 22})$$

1.5.5. Loi de survie :

La probabilité de survie $R(t)$ s'est notée :

$$R(t) = \frac{N(t)}{N(0)} \quad (II.23)$$

Où :

$N(0)$: nombre des composants mis en premier service

$N(t)$: Nombre des survivants à l'instant t

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ s'écrit [21] :

$$\lambda(t) = \frac{N(t-1) - N(t)}{N(t-1)} \quad (II.24)$$

Le MTBF :

$$MTBF = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{N(t)}{N(0)} = \sum_{t=1}^{\infty} R(t) \quad (II.25)$$

- **Les lois continues**

On dit qu'une variable aléatoire suit une loi de probabilité continue lorsqu'elle est définie sur l'ensemble des nombres réels $\mathbb{R}$ et peut prendre une infinité de valeurs. [22]

Il existe plusieurs lois dont nous mentionnons les suivantes :

- Loi exponentielle
- Loi normale (Laplace – Gauss)
- Loi log-normale
- Loi de Weibull

1.5.6. Loi exponentielle :

Cette loi trouve de nombreuses applications dans divers domaines. Elle est simple et largement utilisée en fiabilité, notamment pour modéliser des équipements dont le taux de défaillance est constant. Elle sert à décrire la durée de vie des systèmes sujets à des pannes soudaines et imprévues. [20]

La densité de probabilité $f(t)$ s'est écrite en fonction du paramètre λ :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (II.26)$$

La fonction de défaillance $F(t)$:

$$f(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (II.27)$$

La fonction de fiabilité $R(t)$:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (II.28)$$

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ reste constant dans le temps :

$$\lambda(t) = \lambda$$

La loi exponentielle a une propriété majeure comme étant une loi sans mémoire [23] et [24] :

$$P(T \geq t + \Delta t | T \geq t) = \frac{e^{-\lambda(t+\Delta t)}}{e^{-\lambda t}} = e^{-\lambda \Delta t} = P(T \geq \Delta t), t > 0, \Delta t > 0$$

Le résultat indique que la loi régissant la durée de vie d'un appareil qui a fonctionné sans défaillance jusqu'à l'instant t est la même que la loi régissant la durée de vie d'un appareil neuf. Ce qui nous amène à considérer le dispositif à l'instant t comme neuf.

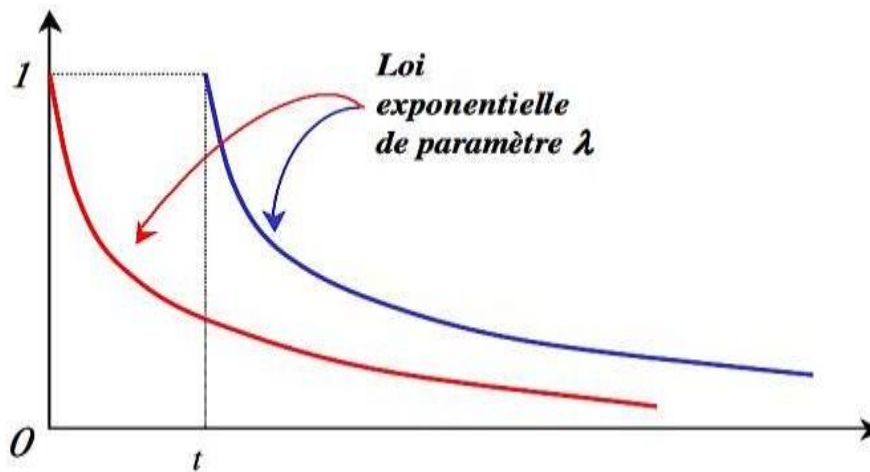


Figure 06 : Propriété sans mémoire de la loi exponentielle [20]

1.5.7. Loi normale [Laplace-Gauss] :

C'est une loi dédiée pour la représentation des durées de vie dans la troisième période de vieillissement des dispositifs avec un taux de défaillance croissant. [21]

$R(t)$ la fonction de fiabilité s'écrit :

$$R(t) = 1 - \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (II.29)$$

Avec :

m : Moyenne (Esperance mathématique) : $m = E(t)$ « m parfois s'écrit μ »

1.5.8. Loi log-normale :

On dit une variable aléatoire X suit une loi log-normale si $Y=\ln(X)$ suit une loi normale de paramètres m et σ .

Si X est le résultat du produit des petits facteurs indépendants, on peut l'attribuer à une loi log-normale. [18] ; [21]

La fonction $R(t)$ de fiabilité :

$$R(t) = 1 - \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln(t)-m)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (II.30)$$

m : la moyenne

σ : l'écart type

Loi de

Weibull :

La loi de **Weibull** est largement reconnue comme l'une des plus utilisées dans de nombreuses industries, notamment en électronique et en mécanique. Sa grande polyvalence permet de modéliser efficacement une large variété de scénarios d'usure. De point de vue générale, la loi de Weibull base sur trois paramètres importants : β , η et γ , strictement positifs :

β : Paramètre de forme

η : paramètre d'échelle

γ : paramètre de position

Sa fonction de densité $f(t)$:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, t \geq \gamma \quad (II.31)$$

La fonction de défaillance s'est notée :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (II.32)$$

Sa fonction fiabilité $R(t)$:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (II.33)$$

Le taux de défaillance $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (II.34)$$

Précédemment on a dit que : distribution de Weibull est la plus répandue, c'est grâce à son adaptabilité avec les différentes phases de la courbe en baignoire, par les valeurs du paramètre de forme ' β ' qu'on peut déduire la phase de vie de composant :

$\beta < 1$: taux de défaillance décroissant (phase de jeunesse)

$\beta = 1$: taux de défaillance constant (phase de vie utile)

$\beta > 1$: taux de défaillance croissant (phase de vieillissement)

[20]

1.5.9. Test d'adéquation Kolmogorov Smirnov « K-S » :

Le test d'adéquation est un outil utilisé pour but de vérifier la validité d'un modèle probabiliste (en hypothèse) à la distribution effective étudiée.

Le test K-S fait ce dernier objet, en fixant le seuil de confiance souhaité. Par comparaison de valeur donnée par la table K-S et la différence deux fonctions (la fonction de répartition réelle $F(t_i)$ et la fonction de répartition théorique $F(t)$).

Sachant que :

$F(t)$: est la fonction répartition théorique donnée par le modèle probabiliste : (exponentielle, normale, Weibull ...)

$F(t_i)$: est la fonction de répartition réelle calculée selon ' n_i ' le nombre des éléments de l'échantillon étudié, où on trouve trois méthodes d'estimation :

$$\text{Méthode des rangs médians : } N < 20 : \Rightarrow F(t_i) = \frac{\sum ni - 0.3}{N + 0.4}$$

$$\text{Méthode des rangs moyens : } 20 < N < 50 : \Rightarrow F(t_i) = \frac{\sum ni}{N + 1}$$

$$\text{Méthode des rangs bruts : } N > 50 : \Rightarrow F(t_i) = \frac{\sum ni}{N + 1}$$

Avec :

N : nombre total des éléments de l'échantillon.

On note :

$$Dn, \max = \max |F(t_i) - F(t)|$$

Dn, α : valeur donnée par la table K-S avec : n : Nombre total des éléments d'échantillon et α : l'erreur statistique.

En comparant les deux valeurs :

$Dn, \max < Dn, \alpha$: modèle probabiliste accepté.

$Dn, \max > Dn, \alpha$: modèle probabiliste refusé. [14], [15]

1.6. Banque de données de fiabilité et taux de défaillance :

L'estimation de la fiabilité a priori des composants, équipements ou systèmes est rendue possible grâce à la fiabilité prédictive. Elle repose sur le développement de modèles mathématiques et physiques de vieillissement, permettant de simuler le comportement de chaque composant. Ces modèles sont construits à partir de procédures de retour d'expérience et de tests spécifiques visant à représenter le comportement en fonction de la fiabilité.

Pour les composants électroniques :

Des différents recueils existants, les couramment utilisés sont :

- **MIL-HDBK-217F** : norme militaire américaine, conçue pour estimer la fiabilité des équipements.
- **RDF2000** : récemment nommé « UTE C 80-810 ». Recueil de fiabilité basé sur le REX (retour d'expérience) de France télécom.
- **FIDES** : Ce jour-là, il est appelé : « UTE C 80-811 ». C'est un guide de recueil basé sur le retour d'expérience d'un consortium d'industriels français.

• Pour les composants non électroniques :

- **Le recueil OREDA (Offshore Reliability Data)** : recueil de fiabilité basé sur le retour d'expérience des exploitants des plates-formes extracôtières.
- **Le recueil EIREDA (European Industry Reliability Data Bank)** : recueil de fiabilité basé sur le retour d'expérience des sociétés européennes.
- **Le recueil NPRD-95 (Non electronic Parts Reliability Data)** : recueil de fiabilité basé sur le retour d'expérience des grandes sociétés américaines.

1.7. Objectifs de la fiabilité :

Parmi les objectifs importants de la fiabilité [14] :

- Évaluation du niveau de confiance dans les équipements et les produits
- Déterminer la durée de vie des équipements.
- Préciser les temps de bon fonctionnement.
- Obtenir une vision claire du comportement des équipements pour structurer une stratégie de maintenance.
- Assurer une meilleure maîtrise de la logistique.

2. La maintenabilité :

3.2. Définition :

Selon la société française de normalisation (AFNOR), la maintenabilité est définie comme : « l'aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état lui permettant d'accomplir sa fonction requise, lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits ». [28]

D'un point de vue probabiliste, elle est exprimée ainsi : « La maintenabilité est la probabilité qu'une opération de maintenance active soit réalisée dans un intervalle de temps donné $[t_1, t_2]$ » [26], [27].

$$M(t) = P\{\text{systeme est repare sur } [0, t]\}$$

Son indicateur clé est MTTR.

3.3. MTTR : « Mean Time To Repair » :

Le temps moyen de réparation MTTR se calcule par :

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt = \frac{1}{\mu} \quad (II.35)$$

3.4. Taux de réparation $\mu(t)$:

Le taux de réparation signifie l'aptitude d'un bien d'être dépanné et/ou réparé.

Il peut être déduit par la relation :

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (II.36)$$

Quand ce terme est constant, la fonction de maintenabilité vaut :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (II.37)$$

3. Disponibilité :

3.1. Définition :

L'AFNOR définit la disponibilité, dans la norme [28], comme : « l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires de maintenance soit assurée ».

En termes probabilistes, la disponibilité se formule ainsi : « la probabilité qu'une entité soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à l'instant t , en supposant que les moyens extérieurs nécessaires sont disponibles ». [29]

Elle est généralement notée :

D(t) dans les ouvrages francophones (pour « Disponibilité »)

A(t) dans les ouvrages anglophones (pour « Availability »). [25]

Un équipement ayant une bonne disponibilité est caractérisé par :

- Une interruption minimale de la production.
- Une capacité à être maintenu et remis en service rapidement.

3.2. Types de disponibilité :

3.2.1. Disponibilité intrinsèque :

C'est le type de disponibilité trouvé en fonction des temps de bon fonctionnement moyens $MTBF$ et les temps moyens de réparation $MTTR$ dont la relation est :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (II.38)$$

3.2.2. Disponibilité instantanée :

C'est la disponibilité d'un système dans un instant donné ' t ', avec la condition : taux de défaillance λ et taux de réparation μ sont constants :

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu + \nu} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (II.39)$$

3.3. Amélioration de la disponibilité :

Pour améliorer la disponibilité d'un bien, il est indispensable, d'une part, de prolonger le $MTBF$ (temps moyen entre pannes) et, d'autre part, de réduire le $MTTR$ (temps moyen de réparation). [15]

4. L'interaction entre les notions FMD :

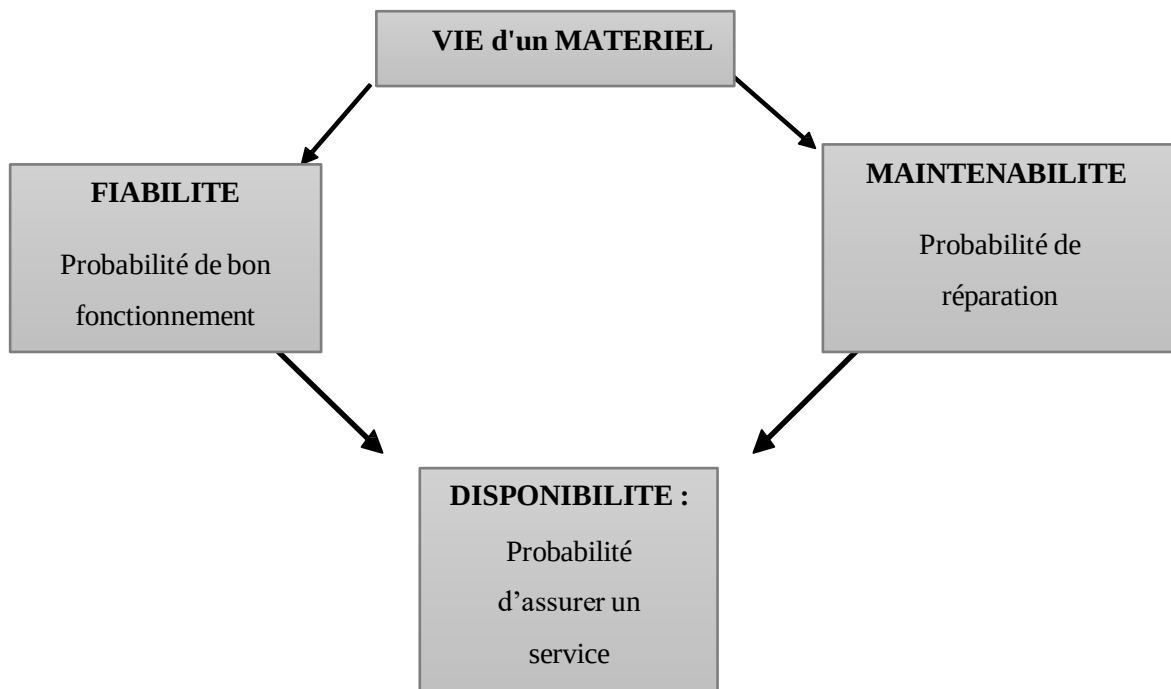


Figure 07 : interaction des notions FMD [15]

Pour pouvoir juger de la disponibilité d'un bien, il est nécessaire qu'il présente une fiabilité optimisée, caractérisée par un **MTBF** prolongé, ainsi qu'une maintenabilité élevée, assurée par un **MTTR** réduit. [15]

Conclusion :

Dans le monde industriel, le concept FMD est le véritable pilote de tout le site de production. La partie administrative : respect des délais clients, gestion de l'offre et de la demande, réputation, qualité des produits ...etc. Dépend entièrement de l'efficacité de la partie opérationnelle, qui doit garantir la continuité de la production.

La maîtrise de cette partie opérationnelle repose sur la connaissance du comportement des équipements, de leur période de vie atteinte, ainsi que sur l'anticipation des scénarios futurs pour intervenir au bon moment.

Ces actions ne peuvent pas se baser sur des suppositions : les temps moyens de bon fonctionnement (MTBF), les taux de défaillance (λ) et les taux de réparation (μ) sont des indicateurs clés permettant une estimation réaliste.

Chapitre III :
Présentation de STPM CHIALI & la
chaîne de PEHD

Introduction :

Dans le cadre de notre travail de fin d'études portant sur l'analyse de la fiabilité d'une chaîne de production, nous avons réalisé une visite approfondie au sein de l'entreprise GROUPE CHIALI, plus précisément dans sa filiale CHIALI TUBES. Cette visite nous a permis de collecter les données nécessaires à notre étude, en nous concentrant particulièrement sur la chaîne de production des tubes PEHD.

Dans cette section, nous présenterons brièvement l'entreprise, en mettant en lumière ses principaux ateliers de production ainsi que les produits finis qu'elle fabrique. Par la suite, nous proposerons une description détaillée de la chaîne de production des tubes PEHD, en expliquant le rôle et le fonctionnement de chaque équipement utilisé.

1. Présentation du groupe CHIALI :

- **Nom** : Groupe CHIALI
- **Raison sociale** : Spa
- **Adresse** : Zone Industrielle, voie A BP 160 22000 Sidi Bel Abbès Algérie.
- **Filiales du groupe** : 8 Filiales Opérationnelles
- **Production** : 600 Produits Fabriqués
- **Gamme de produits** : 2400 Produits Commercialisés
- **Sites de production** : 7 Sites De Production
- **Effectif direct** : 2500 Collaborateurs
- **Réseau de distribution** : 250 Distributeurs & Revendeurs. [30]

1.1. Filiales du groupe CHIALI :

- CHIALI TUBES
- CHIALI PROFIPLAST
- CHIALI SERVICES
- CHIALI ACADEMIE
- CHIALI TRADING
- CHIALI ACCESSOIRES
- CHIALI GLOBAL-PACK
- CHIALI IMMOBILIER. [30]

1.2. Historique du groupe CHIALI :

L'entreprise a connu une évolution significative depuis sa création, avec la création de différentes filiales et l'expansion de son activité dans divers domaines. Voici un aperçu de son historique :

En 1981, la société mère STPM CHIALI a été créée, devenue par la suite la filiale CHIALI TUBES. Elle s'est spécialisée dans la fabrication de tubes PVC à coller, destinés aux réseaux d'eau potable et d'irrigation

En 2004, la filiale STPM SERVICES a été créée, maintenant connue sous le nom de CHIALI SERVICES. Cette filiale opère dans le domaine de l'ingénierie et de la réalisation de projets dans les secteurs des travaux publics, de l'hydraulique, de l'irrigation et de l'environnement.

En 2007, le groupe s'est agrandi avec la création de CHIALI PROFIPLAST, une filiale spécialisée dans la fabrication de profilés PVC pour la menuiserie, ainsi que dans la production de canalisations en PEHD et en PVC.

En 2012, la marque NAWAFID a été lancée. NAWAFID se concentre sur la conception et la fourniture de solutions pour la menuiserie PVC, notamment les fenêtres, les portes, les portes-fenêtres et les volets roulants.

En 2016, CHIALI ACADEMIE a été créée pour gérer la formation interne de l'ensemble des filiales du groupe.

En 2017, la filiale CHIALI TRADING a été créée, spécialisée dans la distribution et la commercialisation des produits fabriqués par le groupe CHIALI. Une autre filiale, ALTIM, a également été créée en partenariat avec le groupe ERHAS, se spécialisant dans l'injection de pièces plastiques pour l'irrigation.

En 2021, deux nouvelles filiales ont été créées : CHIALI GLOBAL-PACK, spécialisée dans la fabrication de films plastiques, et CHIALI IMMOBILIER, spécialisée dans la conception et la réalisation de projets immobiliers haut de gamme et intelligents.

En 2022, la filiale CHIALI Accessoires a vu le jour, axée sur la distribution de quincaillerie, d'accessoires et de systèmes de fermeture pour la menuiserie PVC.

L'entreprise CHIALI a donc élargi ses activités et développé un groupe de filiales, couvrant divers secteurs liés à la plasturgie, à l'ingénierie, à la distribution et à l'immobilier. Cette croissance témoigne de son engagement à offrir une gamme complète de produits et de services à ses clients. [30]

1.3. Domaines d'activité :

Le GROUPE CHIALI se présente aujourd'hui comme fournisseur de solutions complètes et fiables dans l'ensemble des domaines d'activités auxquels il s'adresse [30] :

- Eau
- Agriculture
- Télécom.
- Energie
- Bâtiment

1.4. Produits fabriqués :

- Tubes PEHD transfert d'eau
- Tubes PEHD PE100 distribution d'eau
- Tubes PVC-U à joint assainissement
- Grillages avertisseurs d'eau
- Tubes PEHD réseaux gaz naturel
- Grillages avertisseurs d'énergie
- Tubes PVC-U tubage de forage
- Film plastique stabilisé agricole
- Tubes PEBD goutte à goutte
- Tubes multicouches sanitaire et chauffage
- Tubes PVC- U à coller évacuation
- Profilés PVC menuiserie
- Menuiserie PVC NAWAFID
- Grillage de baillage signalisation
- Mousse XLPE isolation
- Tubes PVC-U rainuré télécommunication
- Tubes PEHD rainuré télécommunication
- Grillages avertisseur télécommunication
- Kit d'aspersion en PEHD. [30]



Figure 01 : Produits de STPM CHIALI [30]

2. Filiale CHIALI TUBES :

Fondée en 1999, CHIALI Tubes constitue le siège social du GROUPE CHIALI et dispose d'un capital de 1 500 000 000 DZD. Entièrement détenue par le groupe, l'entreprise intègre deux unités industrielles spécialisées : l'usine PVC et l'usine PE. Toutes deux sont dotées de lignes d'extrusion de pointe ainsi que de vastes espaces de stockage.

L'usine dédiée au PVC s'étend sur une superficie de 3 hectares. Elle assure la production d'une large gamme de tuyaux en PVC pouvant atteindre un diamètre de 630 mm. Ces conduites sont destinées à la distribution d'eau potable ainsi qu'à l'évacuation des eaux pluviales et usées.

Quant à l'usine de PE, elle couvre 12 hectares et est exclusivement consacrée à la fabrication de tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD), disponibles jusqu'à un diamètre de 630 mm. Ces produits sont principalement utilisés pour le transport de deux ressources essentielles : le gaz naturel et l'eau potable.

Les infrastructures modernes de CHIALI Tubes illustrent l'engagement de l'entreprise en matière de qualité et de performance, lui permettant de répondre efficacement aux besoins variés de ses clients dans les domaines de l'eau, de l'assainissement, de l'énergie, et bien d'autres encore [30].

2.1. Organigramme de CHIALI TUBES :

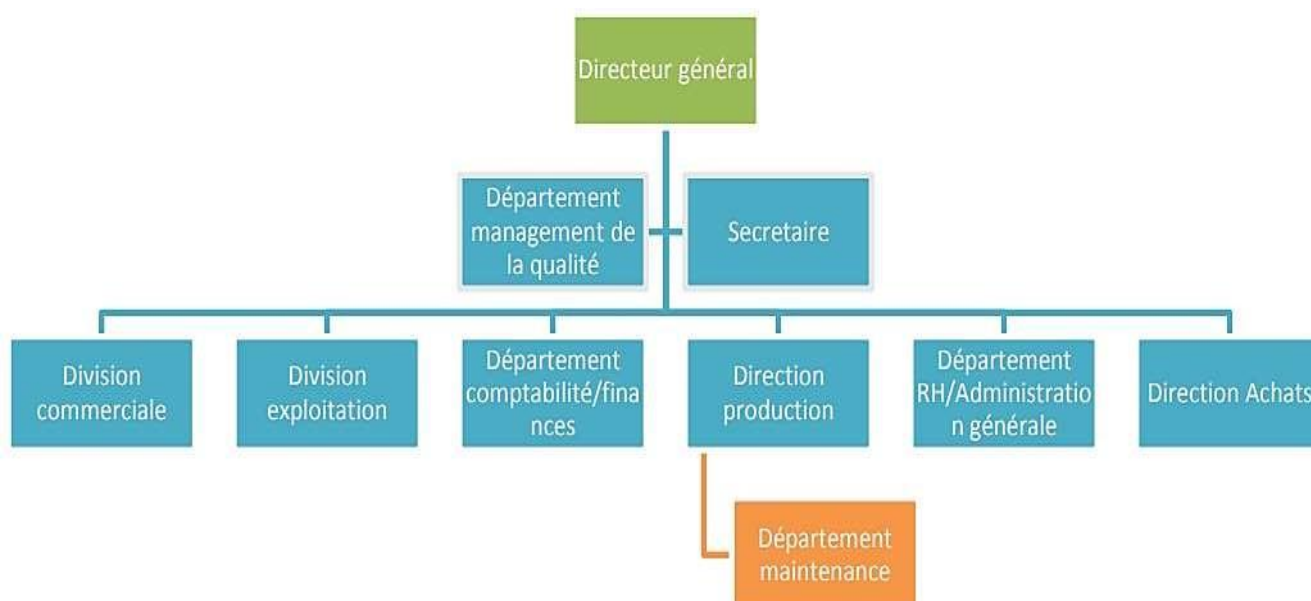


Figure 02 : Organigramme CHIALI TUBES : [31]

2.2. Relations dans la direction de production :



Figure 03 : Relation dans la direction de production [31]

2.3. Différentes lignes de production :

La production dépend de la disponibilité des lignes. Pour cela, une bonne organisation est nécessaire. Chaque ligne est faite pour produire un type de produit ou une taille de tube bien précise. Mais selon les besoins, les commandes sont réparties sur les lignes les plus adaptées, en respectant les délais et les matières premières disponibles.

Le tableau ci-dessous montre toutes les lignes de production de l'unité, avec les types de produits et les tailles qu'elles peuvent fabriquer. Certaines lignes fabriquent des petits diamètres, d'autres sont réservées aux grands diamètres. Ce classement aide à mieux organiser la production selon les besoins de chaque commande.

.

Ce tableau suivant donne tous les diamètres et types de tubes qu'on peut réaliser sur chaque ligne :

Tableau 01 : Différentes lignes & différents produits [31]

Lignes	Type de produits	Diamètre de tube (mm)
A	Rainuré (PN16 ; PN25 ; PN10)	110 ; 90 ; 75 ; 40 ; 63
B	Gaz, PEBD goutte à goutte ; (PN16 ; PN10 ; PN6 ; PN25) ;	20 ; 40 ; 25 ; 10 ; 16
C	Aspersion, Gaz, PEHD, (PN6 ; PN10)	50 ; 63 ; 75 ; 125 ; 200 ; 160 ; 110
D	Rainuré; Gaz	50 ; 63 ; 40
E	PEHD ; PEBD	16 ; 20 ; 25 ; 40 ; 50 ; 63
F	PEHD	315 ; 400 ; 500 ; 630
G	Aspersion, Gaz, PEHD, (PN6 ; PN10)	50 ; 63 ; 75 ; 125 ; 200 ; 160 ; 110
H	Rainuré ; Gaz	50 ; 63 ; 40
I	Rainuré ; Gaz ; PEHD ; (PN10/16/6)	50 ; 63 ; 40
J	Grillage	/
K	Multicouche (50m, 100m)	16 ; 20 ; 26 ; 40
Soudeuse	Gaine	25 ; 32 ; 40
L	Aspersion, Gaz, PEHD, (PN6 ; PN10)	50 ; 63 ; 75 ; 125 ; 200 ; 160 ; 110
M	Gaz, PEBD goutte à goutte ; PEHD ; (PN16 ; PN10 ; PN6 ; PN25)	20 ; 40 ; 25 ; 10 ; 16
N	PEHD (PN16 ; PN10 ; PN6 ; PN25) ;	800 ; 710 ; 630 ; 400 ; 315 ; 500
O	Aspersion : Rouleuse	50 ; 63

Remarque :

Notre travail sera axé sur l'étude de la chaîne de production (F) pour la fabrication des Tube **PEHD**.

Nous allons mettre l'accent sur le processus de fabrication des tubes PEHD, en mettant en lumière les différents équipements utilisés ainsi que leurs fonctions spécifiques. Nous examinerons en détail chaque étape du processus, depuis la préparation des matières premières jusqu'à la finition du produit final. De plus, nous nous attarderons sur les caractéristiques techniques des équipements clés tels que les extrudeuses, les systèmes de refroidissement, les dispositifs de contrôle de qualité et d'autres machines spécialisées qui contribuent à la production efficace et de haute qualité des tubes PEHD.

Avant d'explorer le processus de fabrication des tubes PEHD, prenons d'abord le temps de comprendre en quoi consistent ces tubes et leurs utilisations.

2.4. La ligne de production des Tube PEHD :

2.4.1. Polyéthylènes :

2.4.1.1. Définition :

Le polyéthylène est un polymère de la famille des polyoléfines, obtenu par la polymérisation de l'éthylène (C_2H_4). Il figure parmi les matériaux plastiques les plus répandus à l'échelle mondiale, grâce à sa grande polyvalence et à ses propriétés remarquables.

On le retrouve couramment dans la fabrication de sacs plastiques, de bouteilles d'emballage, ainsi que dans divers articles tels que les jouets..

On distingue principalement deux grandes catégories de polyéthylène, classées selon leur masse volumique:

- **Polyéthylène haute densité (PE-HD) :** $0,95 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,97 \text{ g/cm}^3$

Ce polymère se caractérise par plusieurs propriétés remarquables :

- Excellente isolation électrique
- Bonne résistance aux chocs
- Inertie chimique et biologique élevée, ce qui le rend compatible avec un usage alimentaire

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique, c'est-à-dire qu'il devient malléable lorsqu'il est chauffé, puis durcit en refroidissant. Sa structure moléculaire est constituée par la répétition du motif $-CH_2-$, formant de longues chaînes de macromolécules. [32]

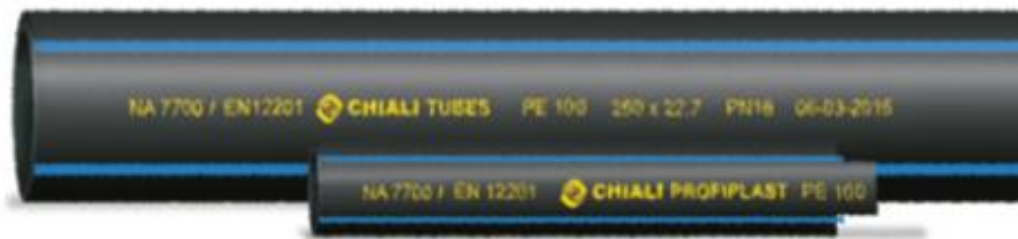


Figure 04 : tube PEHD [30]

2.4.2. Avantages du tubes PEHD :

- Haute résistance aux chocs et à l'abrasion.
- Excellente résistance chimique (corrosion, agents chimiques, produits industriels).
- Bonne flexibilité, même à basse température.
- Étanchéité élevée.
- Durée de vie longue (> 50 ans en conditions normales).
- Léger, donc facile à transporter et à installer.
- Compatible avec le soudage par électro fusion ou poly fusion. [30]

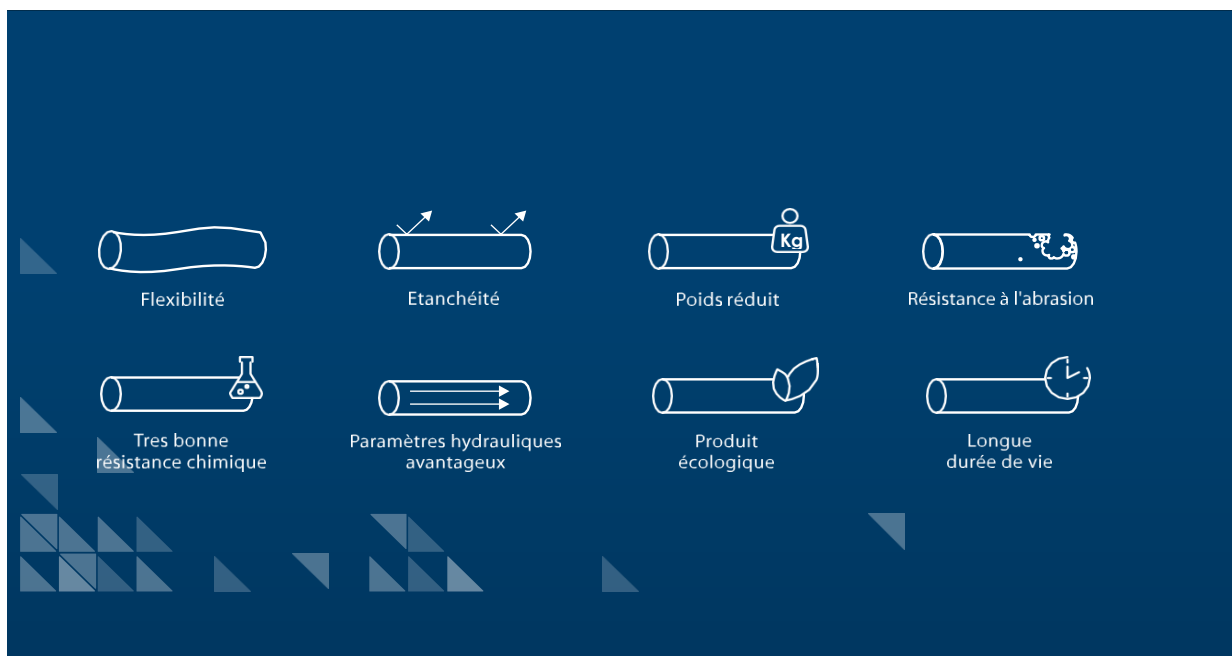


Figure 05 : les avantages du tube [30]

2.4.3. Description de la chaîne de production du PEHD (F) :

La ligne (F) est la ligne dédiée pour la production du PEHD, elle est constituée d'une combinaison de plusieurs équipements :

- Extrudeuse
- 2 bacs de refroidissement et un bac de calibrage
- Tireuse
- Scie automatique
- Imprimante jet d'encre
- Enrôleur

2.4.4. Processus et équipements de fabrication d'un tube PEHD :

La fabrication des tubes PEHD passe par des étapes essentielles telles que :

- Préparation des matières premières
- L'extrusion de tube.
- Passage du tube dans un calibre et un bac de refroidissement.
- Liaison avec une tireuse.
- Marquage du tube.
- Découpage & enroulement.

En plus de ces étapes principales, le processus comprend également des étapes de contrôle des mesures et de la qualité pour garantir la conformité aux normes spécifiées.

2.4.4.1. Préparation de la matière première :

Dans l'atelier de stockage, des spécialistes procèdent à des contrôles rigoureux sur les granulés de polyéthylène afin d'en garantir la qualité optimale. Après vérification de la date de péremption et du taux d'humidité, les granulés conformes sont transférés dans des silos dédiés. Ils sont ensuite acheminés vers les lignes de production par un système de transport souterrain.

Avant leur utilisation dans le processus de fabrication, les granulés subissent une étape de séchage de deux heures dans un sécheur, visant à éliminer toute trace d'humidité résiduelle. Cette opération est essentielle pour assurer des conditions de transformation optimales.

Une fois séchés, les granulés sont dirigés vers une trémie, qui sert de réservoir d'alimentation, puis vers un gravimètre. Ce dernier a pour fonction de doser avec précision la quantité de matière nécessaire à la production, garantissant ainsi un approvisionnement maîtrisé et continu.

Cette étape de préparation des granulés constitue un élément clé pour maintenir la qualité et l'efficacité de la production de tubes PEHD.



Figure 06 : Granules de la matière première

2.4.4.2. L'extrusion de tube :

La composition est acheminée vers le premier élément de l'extrudeuse, connu sous le nom de fourreau. À l'intérieur du fourreau, les granulés sont chauffés à l'aide d'air chaud, se transformant ainsi en une pâte malléable. Une vis sans fin pousse ensuite cette pâte à travers une tête d'extrusion.

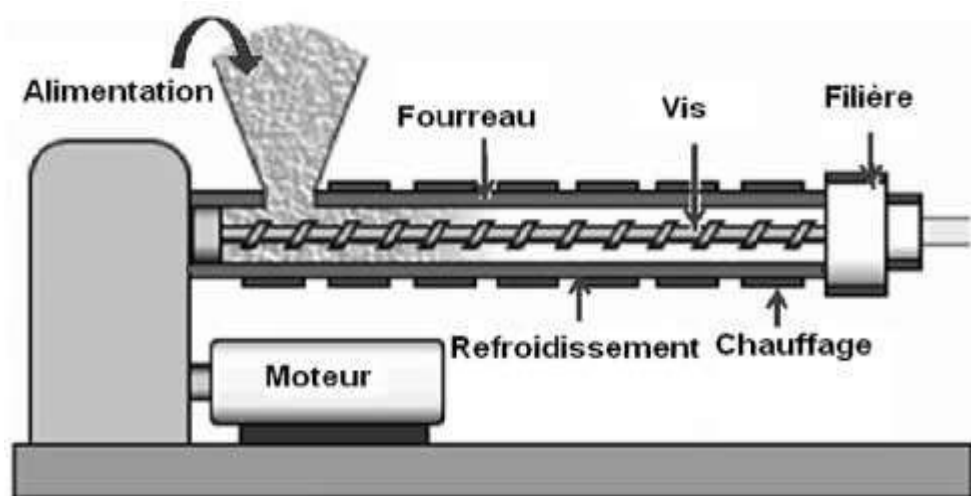


Figure 07 : Composants d'une extrudeuse

Une extrudeuse est composée de plusieurs éléments essentiels, notamment :

Trémie d'alimentation : C'est l'endroit où les matières premières, telles que les granules ou les poudres, sont introduites dans l'extrudeuse. La trémie assure un flux régulier des matières premières vers le reste du système.

Vis sans fin : La vis rotatif. Son rôle est de transporter, mélanger et compresser les matières premières tout au long de leur constitue l'un des éléments essentiels de l'extrudeuse. Elle se présente sous la forme d'un filet hélicoïdal enroulé autour d'un arbre progression dans l'extrudeuse, Pour assurer un traitement optimal, la vis est divisée en plusieurs zones fonctionnelles :

- **La zone d'alimentation**, où les granulés sont introduits et commencent à être déplacés,
- **La zone de compression**, où les matières sont densifiées sous l'effet de la pression et de la chaleur,
- **La zone de fusion**, où elles atteignent un état fondu prêt à être extrudé.

Cette conception segmentée permet un traitement progressif et efficace des matières premières.

Fourreau : Le cylindre est le composant dans lequel tourne la vis d'extrusion. Il est généralement chauffé afin de maintenir les matières premières à une température optimale pour leur fusion et leur extrusion.

Pour un contrôle thermique précis, le cylindre peut également être équipé de systèmes de refroidissement, permettant de réguler la température tout au long du processus et d'assurer une transformation stable et homogène des matériaux.

Tête d'extrusion : La tête d'extrusion constitue l'extrémité de l'extrudeuse, où la matière fondue est façonnée selon la géométrie désirée.

Elle est équipée de matrices, de buses ou d'ouvertures spécifiques qui déterminent la forme, les dimensions et les caractéristiques du produit final. Cet élément joue un rôle crucial dans la précision et la qualité de l'extrusion.

Moteur électrique : Le moteur électrique fournit l'énergie nécessaire à la rotation de la vis et des autres composants mobiles de l'extrudeuse.

Il est généralement couplé à l'équipement via un système d'entraînement, tel qu'un réducteur de vitesse, permettant d'ajuster la vitesse de rotation de la vis en fonction des exigences du processus d'extrusion. Ce réglage précis est essentiel pour garantir la qualité et la régularité du produit final.

Système de contrôle et entraînement : L'extrudeuse est dotée d'un système de contrôle qui permet de réguler avec précision les paramètres clés du processus, tels que la vitesse de rotation de la vis, la température du cylindre, ainsi que d'autres variables critiques.

Ce système assure un fonctionnement optimal de l'équipement en adaptant en temps réel les conditions de production aux exigences techniques.

Par ailleurs, le système d'entraînement prend en charge la rotation de la vis tout en contrôlant la puissance mécanique nécessaire, garantissant ainsi un débit stable et conforme aux besoins du procédé d'extrusion.

2.4.4.3. Passage du tube dans un calibreur et un bac de refroidissement :

Le processus de fabrication d'un tube comprend des étapes essentielles telles que le calibrage et le refroidissement. Le calibrage permet d'ajuster la forme et les dimensions du tube à l'aide d'un bac de calibrage.

Ensuite, le tube passe par un bac de refroidissement où il est plongé dans de l'eau froide. Ce choc thermique contribue à stabiliser la forme du tube.



Figure 08 : Bac de calibrage & refroidissement

2.4.4.4. Liaison avec une tireuse :

Pour assurer la continuité du tube, une **tireuse** est utilisée. Elle relie le tube en cours de fabrication à un produit déchet de même diamètre., puis la tireuse et l'extrudeuse principale fonctionnent à la même vitesse.



Figure 09 : Tireuse

Ensuite, le tube sera dirigé vers le bac de refroidissement (2) pour assurer le bon refroidissement et la solidification.

2.4.4.5. Marquage du tube :

Le tube est chauffé à une température légèrement élevée pour préparer sa surface à recevoir l'ancre et garantir une bonne impression.

Marquage sur tube:

- Norme de fabrication du tube.
- Nom ou code du fabricant.
- Matière : PEHD.
- d_n ; x_{en} : diamètre nominale et épaisseur nominale.
- Date de fabrication.



Figure 10 : marquage des tubes

2.4.4.6. Découpage & enroulement :

Finalement, le tube est délivré à une scie pour un découpage automatique. Après avoir été enroulés dans un enrouleur, les tubes PEHD finis sont dirigés vers une emballeuse qui les enveloppe avec soin, garantissant ainsi une protection adéquate du produit.



Figure 11 : Scie automatique

Ces différentes étapes de fabrication sont nécessaires pour obtenir un tube PEHD de haute qualité, offrant de nombreux avantages et pouvant être utilisé dans divers domaines.

Pour assurer la qualité des tubes, il est essentiel de les soumettre à des contrôles de qualité en laboratoire.

3. Laboratoire contrôle qualité :

La qualité des tubes en polyéthylène extrudé est assurée par un processus rigoureux de contrôle qualité. Chaque étape de la réception des matières premières au stockage, jusqu'à la livraison des produits finis est soumise à une série d'évaluations conformes à des critères de référence bien définis.

Le transport de carburants gazeux est encadré par des normes strictes, notamment EN 1555 et ISO 4437, qui établissent les exigences techniques à respecter. De même, les normes EN 12201 et ISO 4427 précisent les directives applicables à d'autres domaines du processus, notamment pour les réseaux d'eau.

En ce qui concerne le transport de l'eau potable, il s'agit d'un domaine particulièrement sensible. Il exige l'application de méthodes d'analyse spécifiques et rigoureusement référencées, afin de garantir la sécurité sanitaire et la conformité aux standards en vigueur.

3.1. Méthodes de test dans laboratoire :

- Densité : Le principe de ce test est de déterminer la masse volumique du polyéthylène sous forme de granulés (matière première) ou échantillon prélevé sur le tube (produit fini). Les méthodes les plus utilisées sont :

- Tube à gradient
- Balance hydrostatique

Le résultat obtenu classe le polyéthylène en basse ou en haute densité. C'est aussi un paramètre pour le calcul de la masse linéique réelle du tube.

- MFI : L'indice de fluidité est mesuré à l'aide d'un plastomère, ce test ne donne pas les paramètres rhéologiques du polymère mais un résultat comparatif pour prévoir les paramètres d'extrusion.

- TIO : Le DSC (differential scanning calorimetric) est l'appareil de mesure du temps d'induction à l'oxydation. Le principe est de mesurer l'efficacité de l'antioxydant injecté dans la matière de base avant et après transformation. Cela veut dire qu'un échantillon soumis sous un courant d'oxygène pur à une température de 210°C doit résister à une oxydation au-delà de 20 minutes, pour confirmer une éventuelle bonne soudure, et vérifier les contraintes qu'a subi le polymère lors de la transformation.



Figure 12 : analyseur enthalpie différentielle

- Pression hydrostatique : C'est l'un des principaux tests, qui permet de contrôler la résistance à la pression hydrostatique d'un tube, prévoir la résistance circonférentielle de la paroi, l'étanchéité et de définir son MRS.
- Retrait : Ce test permet de mesurer le taux de retrait à une température de 110°C. Le retrait doit être inférieur ou égal à 3 %. L'influence sur les résultats peut provenir de la qualité de la matière première ou du système de refroidissement.
- Fissuration lente :
 - Test à la virole $e < 5\text{mm}$: Une entaille est initiée pour vérifier la résistance à la propagation en milieu tension actif accélérateur. Ce test c'est une assimilation si comme un tube, suite à une erreur de manipulation, reçoit un choc entraîne une fissure qui doit résister à une propagation.
 - Test à la virole $e > 5\text{mm}$: Des entailles longitudinales sont initiées le long de la génératrice du tube, celui-ci est soumis simultanément à une contrainte (défini dans les normes) et une température de 80°C sévères, doit résister sans éclatement durant 165 heures.
- Test de teneur en noir de carbone : La couleur noire du polyéthylène est due à l'injection de 2% environs de noir de carbone. Cet additif a un rôle protecteur du produit fini contre les rayons solaires UV durant le stockage. La méthode la plus utilisée est la pyrolyse
- Test de dispersion : Ce test permet de vérifier la dispersion et les agglomérats du noir de carbone se trouvant dans la masse du polyéthylène à l'aide d'un microscope à oculaire gradué. Une bonne dispersion entraîne une protection couvrant toute la surface du tube exposée aux rayons solaires.

- Test de traction : Le test est effectué sur une éprouvette prélevée d'un tube comme produit fini à l'aide d'un dynamomètre. Cette éprouvette est soumise à une contrainte de traction dont les dimensions et la vitesse de déplacement sont définies par les méthodes d'essai standards. Ce test est effectué sur le produit fini mais pour vérifier la qualité de la matière première. [31]

Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter en détail l'entreprise GROUPE CHIALI, avec un focus particulier sur sa filiale CHIALI TUBES. Nous y avons mis en évidence les produits finis ainsi que l'organisation de ses différents ateliers de production. Une attention spécifique a été portée au processus de fabrication des tubes PEHD, en décrivant les équipements impliqués à chaque étape de la chaîne de production. Cette analyse approfondie nous a offert une compréhension claire de la structure et du fonctionnement global de l'entreprise, posant ainsi les fondements de notre étude.

Dans la continuité de ce travail, le chapitre suivant portera sur l'analyse des données communiquées par le directeur de maintenance, relatives à l'historique des pannes sur la chaîne de production des tubes PEHD. L'objectif principal de cette étude est d'identifier les défaillances récurrentes ainsi que les points critiques de la ligne de production, afin de proposer des solutions concrètes visant à renforcer sa fiabilité. Cette démarche vise à mieux comprendre les causes des arrêts de production et des dysfonctionnements, et ainsi à améliorer la performance globale de l'atelier.

Chapitre IV : Diagnostic & statistiques Des pannes

Introduction :

Au sein d'une unité de production composée de plusieurs chaînes, elles-mêmes constituées de nombreux équipements, chaque équipement étant à son tour formé de plusieurs éléments, il devient complexe d'identifier avec précision les secteurs critiques responsables des arrêts de production.

Cette complexité s'accroît à mesure que le nombre d'équipements et de composants augmente, rendant l'analyse encore plus délicate.

Pour faire face à cette situation, il est essentiel de procéder à une analyse des pannes. Celle-ci permet de cibler les zones réellement problématiques, en évitant de concentrer les efforts sur des secteurs qui ne contribuent pas de manière significative aux interruptions de production. Une telle analyse repose à la fois sur l'historique des équipements et sur la maîtrise d'outils d'analyse reconnus dans l'industrie, tels que :

- La méthode ABC/Pareto,
- La méthode des 5M,
- L'analyse AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), entre autres.

Dans la suite de ce chapitre, nous explorerons ces méthodes en les appliquant à la chaîne de production des tubes PEHD, à partir de l'historique des pannes fourni par le directeur de maintenance et le planificateur de l'entreprise STPM CHIALI.

1. L'historique des pannes de la chaîne PEHD (ligne F) :

L'historique des pannes de la ligne (F) fourni chez CHIALI TUBES, c'est l'historique recensé durant l'année 2024, il est constitué de :

- ❖ « Équipement » : c'est l'acteur principal de l'arrêt
- ❖ « Date de déclaration des pannes » : le début effectif de l'arrêt
- ❖ « Date de début de réparation », « Date de fin de réparation » : la différence de ces deux c'est la durée de réparation.
- ❖ « Temps d'arrêt » : c'est la différence entre « Date de fin de réparation » et « Date de déclaration de panne »

Ces données prises du 16/01/2024 jusqu'à 25/12/2024 sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau 01 : Historique des pannes de la chaîne de PEHD

Équipement	Date de Début de panne	Heures de début de panne	Date de début de réparation	Date de fin de réparation	Temps d'arrêt
Extrudeuse	16/01/2024	8:00	09/01/2024 à 09:30	09/01/2024 à 10:45	2:45:00
Bac de calibrage	23/01/2024	13:00	23/01/2024 à 14:00	23/01/2024 à 15:00	2:00:00
Bac de calibrage	01/02/2024	9:00	01/02/2024 à 09:30	01/02/2024 à 10:30	1:30:00
Extrudeuse	08/02/2024	22:00	08/02/2024 à 22:00	08/02/2024 à 00:00	2:00:00
Tireuse	25/02/2024	10:45	25/02/2024 à 14:00	25/02/2024 à 16:00	5:15:00
Extrudeuse	25/02/2024	18:00	25/02/2024 à 18:30	25/02/2024 à 19:30	1:30:00
Extrudeuse	29/02/2024	3:00	29/02/2024 à 03:00	29/02/2024 à 04:00	1:00:00
Bac de calibrage	01/04/2024	8:30	01/04/2024 à 09:30	01/04/2024 à 10:30	2:00:00
Bac de calibrage	04/04/2024	4:10	04/04/2024 à 08:30	04/04/2024 à 12:30	8:20:00
Extrudeuse	21/04/2024	11:30	21/04/2024 à 15:00	21/04/2024 à 15:30	4:00:00
Extrudeuse	29/04/2024	9:30	29/04/2024 à 14:00	29/04/2024 à 15:00	5:30:00
Extrudeuse	29/04/2024	10:00	29/04/2024 à 10:00	29/04/2024 à 11:30	1:30:00

Gravicolor	12/05/2024	8:00	12/05/2024 à 08:30	12/05/2024 à 09:00	1:00:00
Extrudeuse	25/05/2024	10:30	22/05/2024 à 10:35	22/05/2024 à 14:00	3:30:00
Extrudeuse	02/06/2024	13:50	02/06/2024 à 14:00	02/06/2024 à 14:30	0:40:00
Marqueuse	02/06/2024	16:00	02/06/2024 à 17:50	02/06/2024 à 18:30	2:30:00
Extrudeuse	02/06/2024	16:00	02/06/2024 à 16:00	02/06/2024 à 17:00	1:00:00
Bac de calibrage	03/06/2024	8:00	03/06/2024 à 09:00	03/06/2024 à 16:30	8:30:00
Co-extrudeuse	18/06/2024	7:00	18/06/2024 à 08:00	18/06/2024 à 11:00	4:00:00
Scie	18/06/2024	14:00	18/06/2024 à 16:00	18/06/2024 à 17:30	3:30:00
Extrudeuse	18/06/2024	22:00	18/06/2024 à 22:00	18/06/2024 à 23:30	1:30:00
Table Extérieur	20/06/2024	10:10	20/06/2024 à 11:00	20/06/2024 à 11:30	1:20:00
Co-extrudeuse	24/06/2024	19:00	24/06/2024 à 19:30	24/06/2024 à 20:00	1:00:00
Extrudeuse	03/07/2024	18:00	03/07/2024 à 17:45	03/07/2024 à 18:30	0:30:00
Scie	11/07/2024	9:00	11/07/2024 à 15:00	11/07/2024 à 16:00	7:00:00
Extrudeuse	11/07/2024	10:25	11/07/2024 à 11:00	11/07/2024 à 12:00	1:35:00
Extrudeuse	11/07/2024	15:20	11/07/2024 à 16:00	11/07/2024 à 16:40	1:20:00
Extrudeuse	18/08/2024	8:00	18/08/2024 à 09:00	18/08/2024 à 09:30	1:30:00
Extrudeuse	20/08/2024	14:30	20/08/2024 à 14:40	20/08/2024 à 15:10	0:40:00
Scie	26/08/2024	9:40	26/08/2024 à 14:00	26/08/2024 à 15:00	3:20:00
Extrudeuse	22/09/2024	15:30	22/09/2024 à 15:30	22/09/2024 à 17:00	1:30:00
Scie	24/09/2024	8:00	24/09/2024 à 09:30	24/09/2024 à 09:40	1:40:00
Bac de calibrage	27/09/2024	19:20	27/09/2024 à 21:00	27/09/2024 à 00:00	4:40:00
Bac de calibrage	29/09/2024	14:20	29/09/2024 à 15:00	29/09/2024 à 15:30	1:10:00
Extrudeuse	06/10/2024	14:00	06/10/2024 à 11:00	06/10/2024 à 15:30	1:30:00
Outillage Tête	29/10/2024	8:30	29/10/2024 à 10:00	29/10/2024 à 12:00	3:30:00

Extrudeuse	29/10/2024	8:30	29/10/2024 à 15:30	29/10/2024 à 16:30	8:00:00
Extrudeuse	02/11/2024	14:40	02/11/2024 à 15:00	02/11/2024 à 18:00	3:20:00
Table Extérieur	11/11/2024	08:00	11/11/2024 à 8:30	11/11/2024 à 16:00	8:00:00
Extrudeuse	05/12/2024	9:00	08/12/2024 à 09:00	08/12/2024 à 11:00	2:00:00
Tireuse	05/12/2024	22:00	06/12/2024 à 22:00	06/12/2024 à 11:30	84:00:00
Bac de refroidissement N° 02	25/12/2024	15:30	26/12/2024	26/12/2024	2:00:00

2. Méthode ABC Pareto :

Wilfredo Pareto, économiste et sociologue italien, a mis en évidence le fait que, dans de nombreux cas, seul un petit nombre de causes est responsable de la majorité des effets observés. Ce constat a donné naissance au principe de Pareto, également appelé règle des 80/20, selon laquelle 20 % des causes génèrent 80 % des conséquences.

Cette répartition inégale, fréquemment observée dans divers domaines, permet de distinguer les problèmes majeurs des problèmes secondaires. En établissant une hiérarchisation des causes, ce principe offre un outil stratégique pour concentrer les efforts sur les phénomènes les plus significatifs, facilitant ainsi la priorisation des actions correctives à entreprendre.

2.1. Définition :

La méthode de **Pareto** est une technique d'analyse accompagnée d'une représentation graphique très utile pour tout gestionnaire. Elle permet, à partir de données chiffrées, d'avoir une vue claire **et visuelle** de l'importance relative des différents problèmes ou phénomènes. Cela aide à identifier les priorités d'action, en se concentrant sur les causes qui ont le plus grand impact. [33]

2.2. Méthode de Pareto et la multitude d'utilisation :

La méthode 80-20 a la propriété de souplesse, on peut l'adapter à n'importe quel problème qui est résulté par un cumul de causes, dont le but est de cibler les causes les plus importantes qui génèrent un pourcentage élevé de résultat.

D'après [34] nous pouvons citer quelques domaines d'utilisation :

- Marketing
- Production
- Contrôle de qualité
- Maintenance
- Gestion du stock

2.3. Procédure de la méthode :

Comme toute autre méthode d'analyse, ABC a des étapes bien ordonnées pour atteindre des résultats souhaitables [34] :

- Former une liste des acteurs du phénomène : dans notre cas les acteurs principaux sont les équipements de la chaîne de production.
- Classer ces acteurs selon l'objet de l'étude de façon décroissante : l'objet c'est de savoir quels sont les équipements qui font des arrêts le plus, du coup, on les classe selon les durées d'arrêts ou bien selon le nombre des arrêts d'ordre décroissant.
- Calculer le pourcentage de chaque acteur par rapport au total : la durée d'arrêt de chaque équipement par rapport à la durée totale d'arrêt ou bien le nombre d'arrêt de chaque équipement par rapport au total.
- Faire le cumul de ces pourcentages.
- Tracer la courbe en fonction des pourcentages cumulés.
- Deviser les zones 80%, 95%, 100%
- Interpréter les résultats

2.4. Objectif de la méthode en maintenance :

La méthode de Pareto peut être appliquée à différents niveaux d'analyse, qu'il s'agisse d'une usine dans son ensemble, d'une chaîne de production ou d'un équipement spécifique. L'objectif est d'identifier les 20 % de machines ou de causes responsables de 80 % des arrêts de production, que ces arrêts soient mesurés en durée d'interruption, en nombre de pannes ou à l'aide d'un autre indicateur pertinent.

À l'issue de cette analyse, le principe 80/20 permet d'établir une hiérarchie des priorités, en mettant en évidence les causes critiques sur lesquelles concentrer les efforts de maintenance ou d'amélioration. Cela facilite la prise de décisions ciblées et efficaces, en vue de réduire significativement les arrêts et optimiser la performance globale du système.

2.5. Application :

Par la projection de cette méthode sur notre cas, on efforce à citer les équipements critiques, fréquemment tomber en panne, on considère le nombre de pannes de chaque équipement (fréquence de panne) comme intermédiaire qu'on calcule à travers.

On recense pour chaque équipement le nombre des pannes convenables.

Le tableau ci-dessous montre les fréquences des pannes ordonnées de façon décroissante, leur pourcentage par rapport au total ainsi que leur cumulé comme exige la méthode.

Tableau 02 : Paramètres de diagnostic en fonction de fréquence d'arrêt

Équipement	Nb des pannes	Pourcentage	Pourcentage cumulé
Extrudeuse	21	50,00%	50,00%
Bac de calibrage	7	16,60%	66,60%
Scie	4	9,52%	76,12%
Tireuse	2	4,76%	80,88%
Co-extrudeuse	2	4,76%	85,64%
Table Extérieur	2	4,76%	90,40%
Gravicolor	1	2,40%	92,80%
Marqueuse	1	2,40%	95,20%
Outillage Tête	1	2,40%	97,60%
Bac de refroidissement N° 02	1	2,40%	100%

La figure ci-dessous est la représentation graphique de la méthode de Pareto, qu'à travers on peut désigner les trois zones A, B et C.

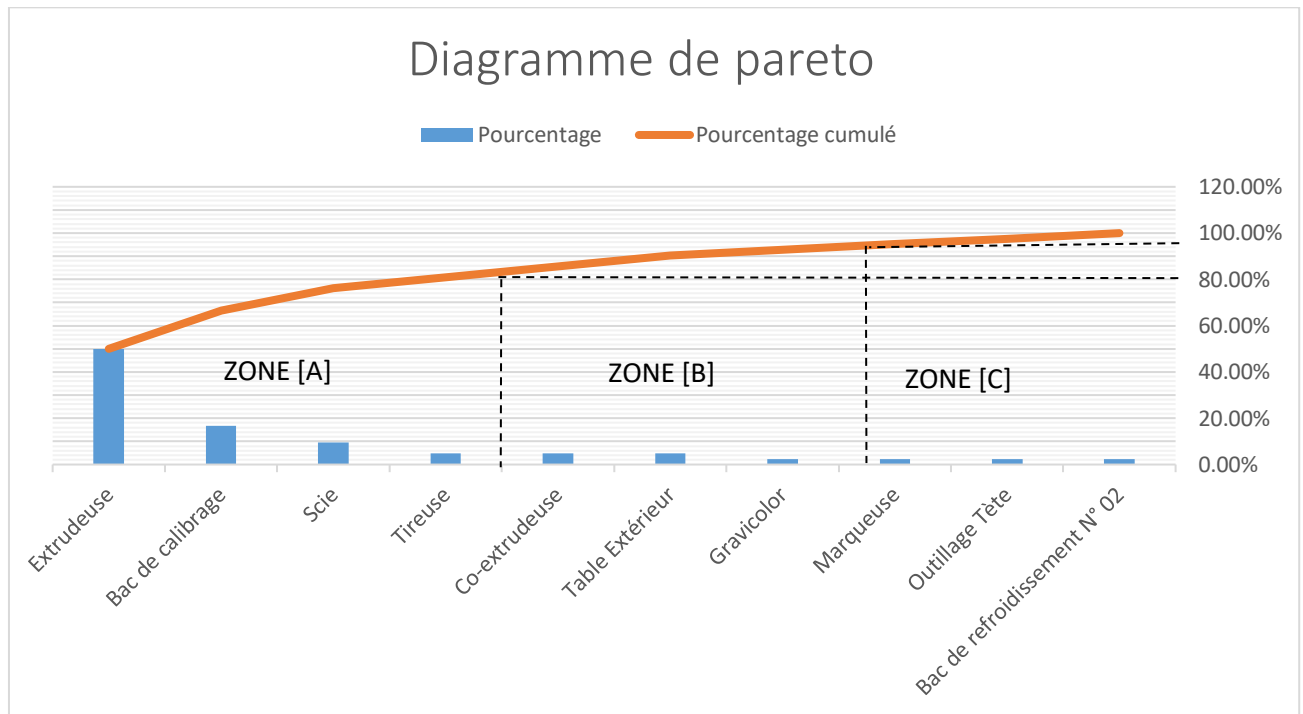


Figure 01 : Représentation graphique des zones A, B et C en fonction de fréquence d'arrêts

❖ Interprétation :

Le diagramme présenté dans la figure permet de classer les équipements selon leur impact sur la chaîne de production, en trois zones distinctes : A, B et C.

- **Zone « A » :** Cette zone regroupe les équipements prioritaires en matière de maintenance, car ils sont responsables de 80,88 % des arrêts enregistrés. Il s'agit de l'extrudeuse, du bac de calibrage, de la scie et de la tireuse. Ces équipements présentent une faible fiabilité en termes de fréquence d'arrêt. Une stratégie de maintenance préventive renforcée est donc indispensable pour limiter les interruptions récurrentes de la production.
- **Zone « B » :** Cette zone représente 12,8 % des arrêts et concerne les équipements suivants : Co-extrudeuse, table extérieure, et gravicolor. Des actions de maintenance préventive ou corrective peuvent être envisagées en fonction de la nature des pannes, de leur complexité et des coûts associés.
- **Zone « C » :** Représentant les 7,2 % d'arrêts restants, cette zone comprend les équipements suivants : marqueuse, outillage tête, et bac de refroidissement n°02. Leur impact étant limité, les interventions peuvent être planifiées de manière moins urgente.

Toutefois, il est important de noter qu'une analyse fondée uniquement sur la fréquence des arrêts ne permet pas de couvrir tous les aspects de la performance. En effet, un équipement peut présenter une fréquence élevée de pannes mais être réparé rapidement, réduisant ainsi son temps d'indisponibilité réel. C'est pourquoi cette approche devrait être complétée par d'autres indicateurs, tels que le temps moyen de réparation (MTTR) ou le taux de disponibilité, pour une évaluation plus globale et pertinente.

Pour cette raison, on enchaîne les analyses précédentes avec les suivantes qui seront basées sur les temps d'arrêt.

Le tableau suivant regroupe les paramètres de calcul utilisé :

Tableau 03 : Paramètres de diagnostic en fonction des temps d'arrêt

Équipement	Total arrêt	Pourcentage	Pourcentage cumulé
Extrudeuse	46:50	30,79%	30,79%
Bac de calibrage	28:10	18,52%	49,32%
Bac de refroidissement N° 02	21:30	14,14%	63,45%
Tireuse	18:45	12,33%	75,78%
Scie	15:30	10,19%	85,97%
Table Extérieur	09:20	6,14%	92,11%
Co-extrudeuse	05:00	3,29%	95,40%
Outillage Tête	03:30	2,30%	97,70%
Marqueuse	02:30	1,64%	99,34%
Gravicolor	01:00	0,66%	100,00%
TOTAL	152:05:00	100,00%	100%

La figure ci-dessous est une représentation du diagramme de Pareto :

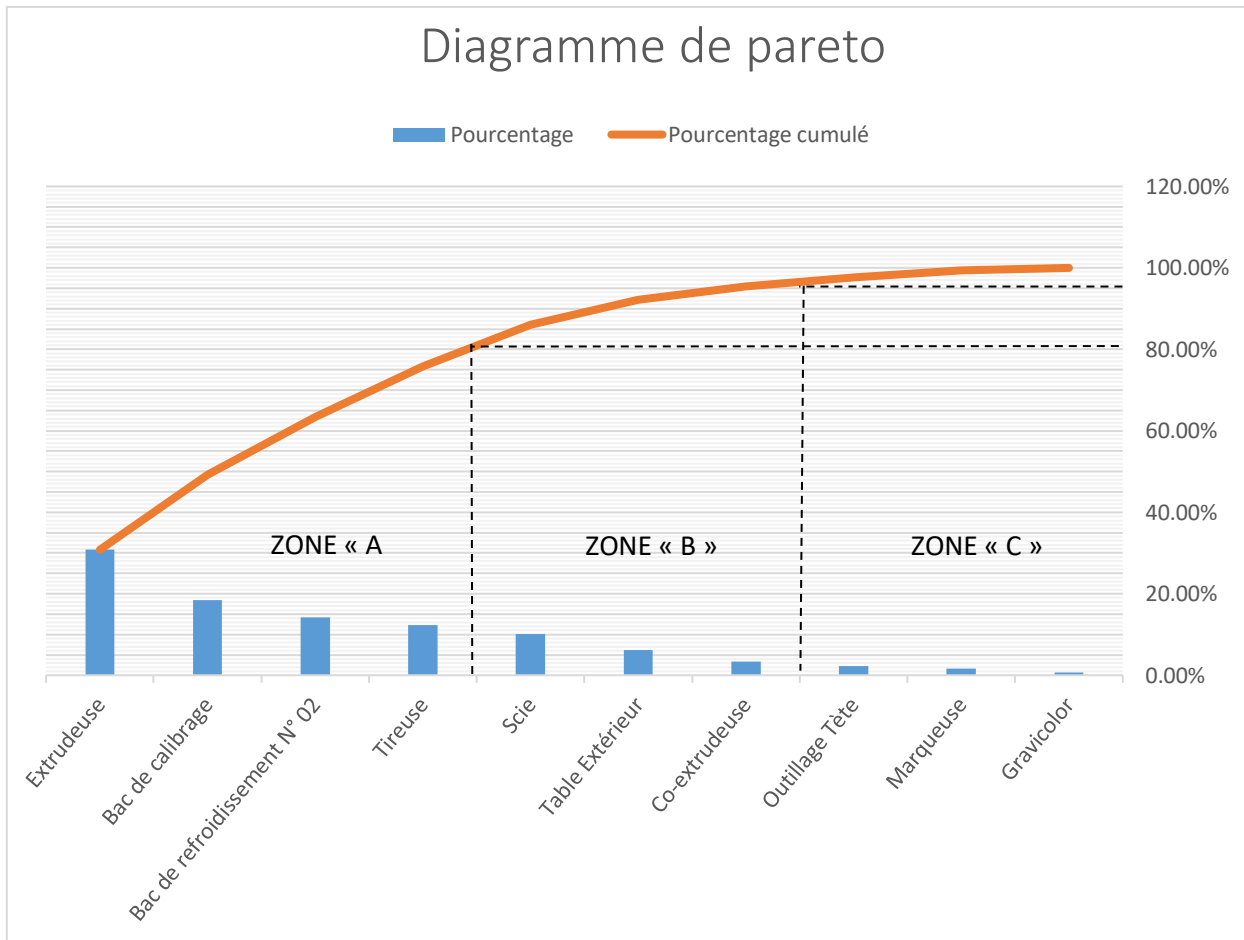


Figure 02 : Représentation graphique des zones A , B et C en fonction des temps d'arrêts

❖ Interprétation :

En fonction des temps d'arrêts, les équipements prioritaires sont des équipements avec une mauvaise maintenabilité.

Zone « A » : 4 équipements trouvés dans cette zone, « Extrudeuse, Bac de calibrage, Bac de refroidissement N° 02 et Tireuse » font 75,78% du pourcentage cumulé des temps d'arrêts. Ces équipements ont une mauvaise maintenabilité.

Zone « B » : « Scie, Table Extérieur, Co-extrudeuse » représentent environ 20% de pourcentage cumulé

Zone « C » : Le reste des équipements se trouve dans cette zone, participent avec 5% du pourcentage cumulé d'arrêt.

❖ **On conclut :**

Il est clairement remarquable que :

L'extrudeuse est :

- L'acteur principal de la mauvaise maintenabilité
- L'équipement de la plus mauvaise fiabilité.

❖ À travers ces conclusions précédentes, nous allons utiliser les deux prochaines méthodes pour agir sur chaque équipement et l'améliorer:

- La méthode d'ISHIKAWA pour améliorer la maintenabilité de l'extrudeuse.
- L'AMDEC pour améliorer la fiabilité de l'extrudeuse.

3. Méthode d'Ishikawa :

Kaoru Ishikawa, ingénieur en chimie appliquée, ancien professeur à l'université de Tokyo et ancien président de l'Institut de technologie de Musashi au Japon, est à l'origine du développement d'une méthode d'analyse systémique des causes d'un problème à travers ses effets.

Cette méthode repose sur l'utilisation d'un diagramme visuel [35], développé dans un contexte culturel japonais où la communication écrite repose fortement sur la clarté visuelle. En effet, la langue japonaise utilise des idéogrammes, c'est-à-dire des symboles représentant des idées ou concepts, ce qui explique l'importance du recours aux croquis et représentations graphiques. Dans le même esprit, le diagramme d'Ishikawa permet de visualiser de manière structurée l'ensemble des causes potentielles d'un problème, en facilitant l'identification des sources profondes de dysfonctionnement dans un processus.

Selon son objectif, sa structure et ses axes d'analyse, cette méthode est également connue sous plusieurs appellations :

- Méthode des causes-effets : car elle établit une relation directe entre un effet observé (problème) et ses causes potentielles.
- Méthode des 5M : en référence aux cinq grandes catégories de causes souvent utilisées dans le cadre industriel, toutes commençant par la lettre « M » : Milieu, Méthode, Main-d'œuvre, Matière, Matériel.
- Diagramme en arête de poisson : en raison de la forme visuelle du diagramme, qui évoque le squelette d'un poisson, avec l'effet en tête et les causes ramifiées de part et d'autre de l'axe central.

3.1. La procédure de la méthode :

La démarche de la méthode d'Ishikawa passe par des étapes essentielles afin d'arriver à des résultats souhaitables et logiques.

- Décrire le problème ou la défaillance.
- Déterminer les causes qui ont pu déclencher le problème. En général, on utilise soit le Brainstorming, soit la méthode des 5M.

Notable que : le Brainstorming est la méthode dans laquelle chaque individu de l'équipe de travail exprime ses suggestions de façon spontanée.

- Tracer le squelette du diagramme d'Ishikawa (sous forme d'arête de poisson) en y mentionnant les 5M.
- Pour chaque catégorie de 5M, inscrire les causes suggérées par les membres du groupe en posant toujours la question : pourquoi telle cause produit-elle cet effet ?
- Classer les causes proposées ou les hypothèses en de sous catégories.
- Définir les causes premières qu'il est possible de soustraire, voire même éradiquer.
- Trouver les solutions adéquates aux causes en mettant en place des actions correctives.

3.2. Diagramme d'ISHIKAWA :

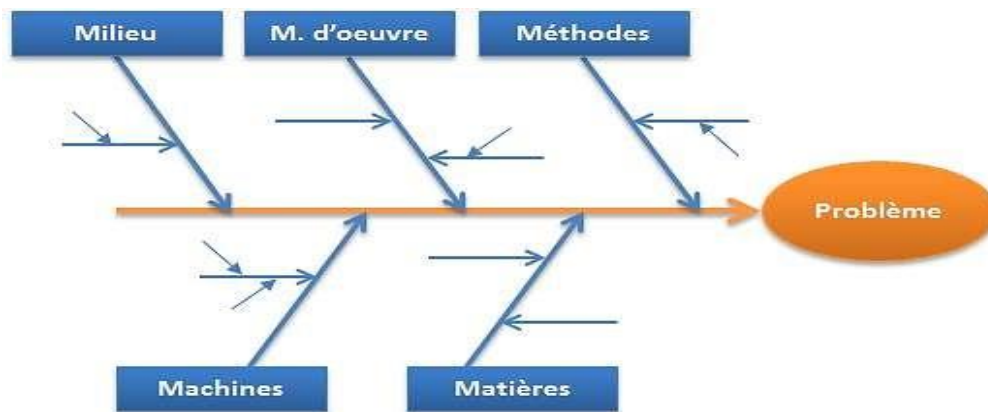


Figure 03 : Forme générale du diagramme d'ISHAKAWA [36]

3.3. Application :

On fait la projection de cette méthode sur notre cas d'étude où :

- L'effet principale c'est : « Une mauvaise maintenabilité de l'extrudeuse »
- Les causes susceptibles d'apparition de cet effet principal selon la méthode 5M sont schématisées sur la figure ci-dessous :

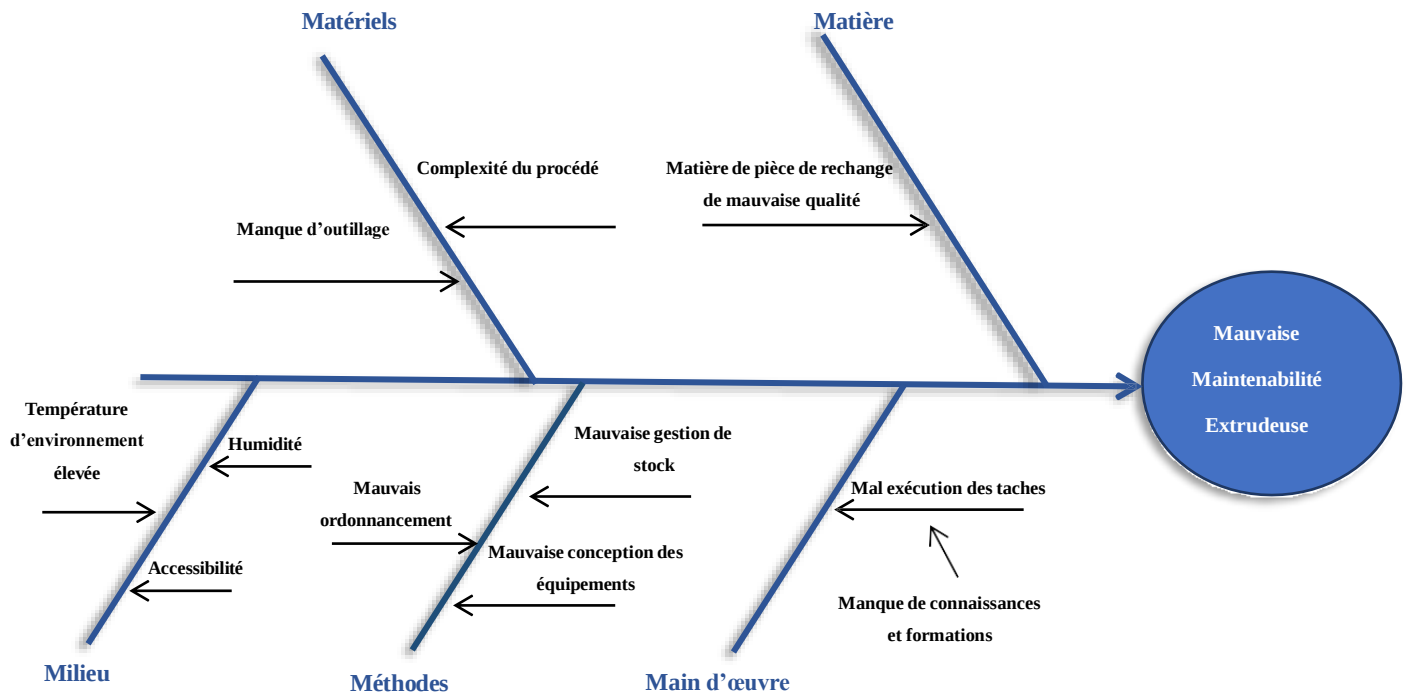


Figure 04 : Diagramme d'Ishikawa adaptée au cas d'étude

• Les actions proposées pour améliorer sa maintenabilité :

Recommandations pour l'amélioration de la performance de la chaîne de production :

1. Former le personnel sur le procédé de fabrication et fournir les outils adaptés afin de garantir une meilleure maîtrise des équipements et une intervention rapide en cas de dysfonctionnement.
2. Optimiser l'ordonnancement des tâches pour réduire les temps d'arrêt et améliorer la fluidité des opérations de maintenance.
3. Renforcer la gestion des stocks en assurant la disponibilité permanente des pièces de rechange, tout en veillant à leur qualité et conformité avec les équipements.
4. Profiter de l'arrêt annuel pour planifier une rénovation ciblée de l'extrudeuse, incluant une amélioration de sa conception afin de faciliter l'accessibilité lors des interventions de maintenance.

4. Méthode AMDEC :

Parmi les méthodes trop répandues dans les sites industriels, la méthode AMDEC dans les sens de la sûreté de fonctionnement (Sdf) et la gestion de la qualité totale en assurant le bon fonctionnement et la fiabilité des installations, des produits et des processus industriels.

4.1. Définition :

L'AMDEC, ou analyse des modes de défaillance, des effets et de la criticité, est un puissant outil d'analyse qui permet l'identification complète des risques potentiels associés à un processus, un produit ou une méthode de production. Cette méthode fait partie intégrante de la gestion des risques, car elle permet de développer des mesures préventives pour atténuer ou éliminer les risques susceptibles de menacer la sécurité des utilisateurs, la productivité, les normes de qualité et la satisfaction des clients. Son principal objectif est d'établir un cadre de contrôle proactif des risques et de faciliter la mise en œuvre de plans d'action pour traiter les domaines de préoccupation potentiels. [37]

4.2. Objectif de la méthode :

L'AMDEC est une méthode utilisée pour identifier les défaillances potentielles pouvant affecter le fonctionnement d'un système ou d'un processus. Elle repose sur le principe de criticité, qui permet de classer les modes de défaillance en fonction de leur impact, de leur fréquence et de leur détectabilité, afin de prioriser les actions correctives ou préventives.

L'objectif principal de cette démarche est de garantir la sécurité et la fiabilité d'un produit, d'un système ou d'un équipement de production, tout en assurant sa maintenabilité et sa disponibilité, conformément aux exigences normatives et aux standards industriels. [38]

4.3. Principe d'AMDEC :

Pour élaborer un plan d'action préventif efficace par AMDEC, un haut niveau de connaissance du système est essentiel au sein de l'équipe qui y travaille. Cette connaissance facilite la réponse aux quatre questions fondamentales [38] :

- « *Qu'est-ce qui pourrait aller mal ?* » : Mode de défaillance
- « *Quels pourraient être les effets ?* » : Effets possibles
- « *Quelles pourraient être les causes ?* » : Causes possibles
- « *Comment faire pour voir ça ?* » : Plan de surveillance

4.4. Procédure d'AMDEC :

Les étapes principales lors de la méthode sont :

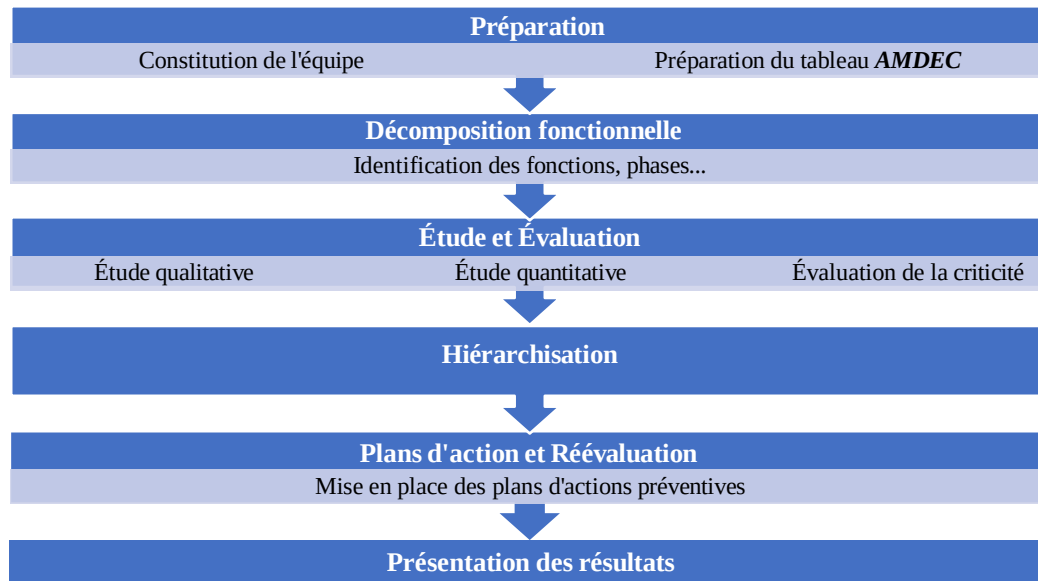


Figure 05 : Etapes principales d'une démarche AMDEC [38]

4.5. Tableau AMDEC :

Le tableau AMDEC est composé de plusieurs colonnes qui incluent le numéro de pièce ou la phase, ainsi que les modes de défaillance potentiels, les causes possibles et leurs conséquences correspondantes. En outre, le tableau contient une évaluation qui intègre l'indice de priorité des risques, ainsi que les actions préventives et/ou correctives proposées.

Pièces, phases...	Modes de défaillance préventives	Causes possibles	Effets potentiels	Evaluation				Actions
				G	F	D	C	

Figure 06 : Forme générale du tableau AMDEC [38]

4.6. Application :

Lors de l'analyse avec la méthode **ABC de Pareto**, basée sur la fréquence des arrêts, nous avons identifié les équipements les plus responsables des pannes. Ces équipements ont été considérés comme prioritaires, car ils montrent une faible fiabilité.

Parmi eux, **l'extrudeuse** est l'équipement qui provoque le plus d'arrêts. C'est pourquoi nous avons décidé de réaliser une analyse AMDEC sur cette machine. Cette analyse va nous aider à mieux comprendre ses pannes, leurs causes, leurs conséquences, et à proposer des actions pour les éviter ou les réduire.

Schéma des sous-systèmes L'extrudeuse :

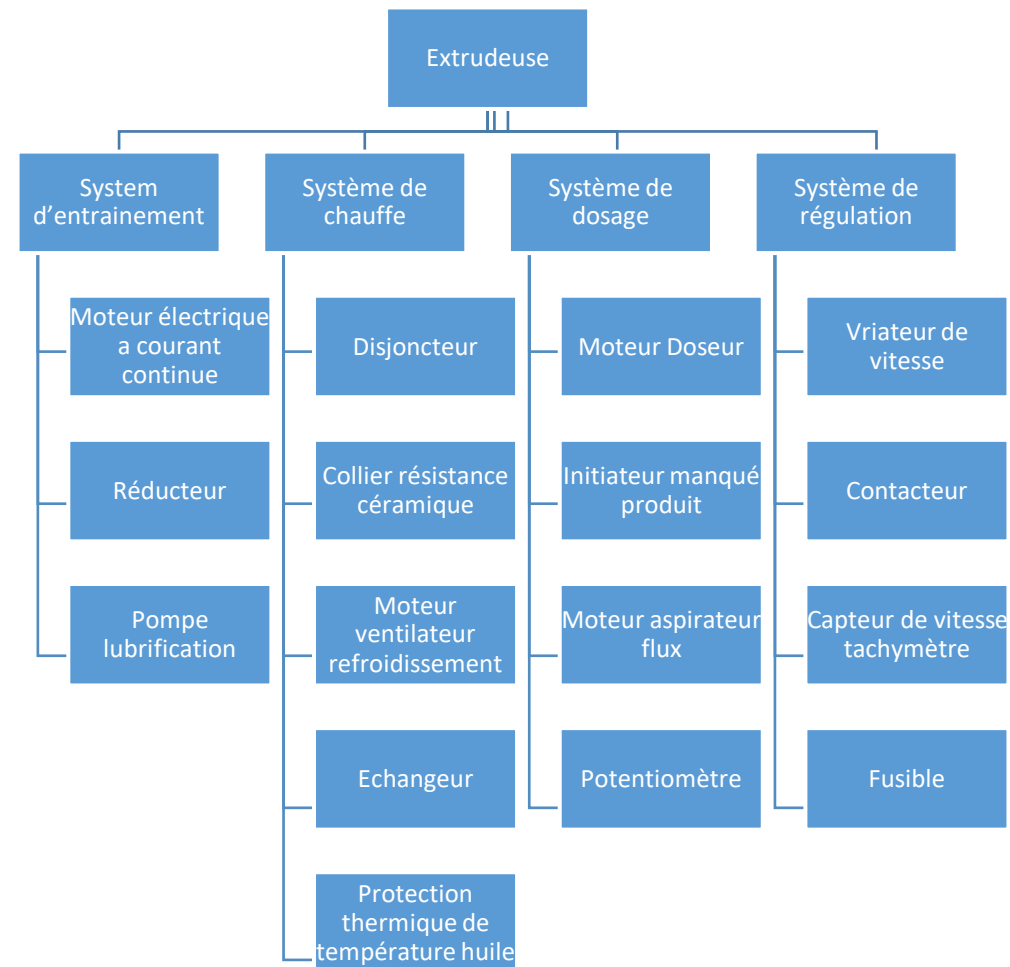


Figure 07 : Schéma des sous-systèmes de l'extrudeuse

Tableau 04 : analyse AMDEC sous-système : Entraînement :

Date d’analyse : 27/05/2025	AMDEC-MACHINE : ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE, DE LEURS EFFETS ET LEURS CRITICITE									
	Système : Extrudeuse Sous-systèmes :Entrainement									
	Élément	Fonctions	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
G							F	D	C	
Moteur électrique a courant continue	-Convertir l’énergie électrique en énergie mécanique - Donner un mouvement de rotation à réducteur	-Vibration du rotor + température élevée	Roulements, stator ou bien rotor Marche bruyant. Elévation de la température	-Déclenchement Variateur -Thermocouple	-audience -visuels	2	2	3	12	Graissage chaque mois. -Changement systématique
Réducteur	-Réduire la vitesse du moteur, augmenter le couple	-usure des pignons	-Manque d’huile -Vibration des axes Manque ou excès de graissage dans les roulements	Casse des pignons Rapport de vitesse non respecté Puissance et couple non transmis	-Vibration - Bruit	3	1	4	12	-Vérifier systématiquement le niveau d’huile -Vérifier systématiquement l’étanchéité - Vérifier l’état des engrenages.

Pompe lubrification	Refroidissement réducteur	-Température élever (ambiante)	-Réducteur chauffe	-Détérioration moteur ou pompe -Conduite bouché	-Test moteur -visuelle	2	2	2	6	Vérification le moteur et le pompe Vérification les conduite Vérification d'huile
--------------------------------	------------------------------	-----------------------------------	-----------------------	---	---------------------------	---	---	---	---	---

Tableau 05 : Analyse AMDEC sous-système : chauffe :

Date d’analyse : 27/05/2025	AMDEC-MACHINE : ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE, DE LEURS EFFETS ET LEURS CRITICITE									
	Système : Extrudeuse Sous-systèmes : chauffe									
Élément	Fonctions	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité				Actions
						G	F	D	C	
Disjoncteur	Protéger les circuits des collier chauffent	protection	Court-circuit- surtension	Coupure de courant	Visuelle	1	1	2	2	Vérification les circuit électrique
Collier résistance céramique	Chauffer cylindre	La température insuffisante	Eclatement la bride saccarifiable	-Aucun alimentation	-Affichage sur thermorégulateur	2	1	2	4	-vérification circuit de puissance -changement les collier

Moteur ventilateur refroidissement	Refroidissement en cylindre	Vibration excessives	Défaut d'alignement	-Thermorégulateur en défaut -Thermocouple en défauts -collage contacteur	Visuelle	2	2	2	6	-serrage vis fixation Vérification vibration
Echangeur	Refroidissent huile	Température élever	Huile chauffe	Conduite d'eau bouché ou cassé	-Fuite d'eau - température élever	2	2	2	6	Vérification les conduites
Protection thermique de température huile	Affichage la température d'huile	Capteur de température	-arrêt immédiate	-défaut sur moteur pompe huile -défaut sur échangeur de température	Absence d'alarme malgré T° élevée	2	1	2	4	Changement le capture

Tableau 06 : Analyse AMDEC sous-système : Doseur :

Date d'analyse : 25/05/2023	AMDEC-MACHINE : ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE, DE LEURS EFFETS ET LEURS CRITICITE									
	Système : Extrudeuse Sous-systèmes : Doseur									
Élément	Fonctions	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité				Actions
						G	F	D	C	
Moteur Doseur	Alimentation produite	Surchauffe du moteur	Surutilisation	Moteur en défaut	Visuelle	2	2	2	6	-vérification moteur Vérification réducteur -vérification la vis
Initiateur manqué produit	Détecter présence ou manque produit	Non détection de produit manque produit	Déclenchement immédiate	-Mauvaise réglage -capteur grillée -mauvaise connexion	Alarme Visuelle	2	1	2	4	-réglage position -serrage connexion -changement initiateur

Moteur aspirateur flux	Aspirer les grain (PEHD)	Moteur à l'arrêt complet	Accumulation des grains	Court-circuit, surchauffe moteur	Alarme , arrêt ligne	3	4	9	10 8	-changement aspirateur - vérification commande électrique
Potentiomètre	Démarrage moteur et changement la vitesse moteur doseur	Aucun variation de vitesse	Fluctuation vitesse	Encrassement	Visuelle Affichage	2	2	2	6	Changement potentiomètre Vérification paramètre

Tableau 07 : Analyse AMDEC sous-système : Régulation de la vitesse :

Date d’analyse : 27/05/2025	AMDEC-MACHINE : ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE, DE LEURS EFFETS ET LEURS CRITICITE									
	Système : Extrudeuse Sous-systèmes : Régulation de la vitesse									
	Élément	Fonctions	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de défaillance	Détection	Criticité			
G							F	D	C	
Variateur de vitesse	Maintenir la vitesse nécessaire	Perte de mesure Perte de programmation	Défaillance de capteur	Vitesse irrégulière	Control visuel	4	1	3	12	Reprogrammation de régulateur Changement de capteur
Contacteur	Etablir/ Interrompe le Passage de commande électrique aux résistances ou moteurs partir de la commande	Défaillance de Bobine Défaillance des jeux de contacte et partie fixe et mobile de contacte	Courant insuffisant	Mauvaise commande Arrêt de machine	-Vibration Etincelle électrique	1	1	2	2	-vérification parti fixe et mobile de contacteur vérification leur contact et bobine -changement contacteur

Capteur de vitesse tachymètre	Lecteur la vitesse	Défaut sur variateur - incontrôlée vitesse du moteur	Déclenchement immédiate	Rupture du capteur de combustion interne Dysfonctionnement de tachymètre	Affichage	1	1	2	2	-changement tachymètre
Fusible	Protéger les circuit électrique	Protéger	Court-circuit-surtension	Coupure de courant	Visuelle	1	1	2	2	Vérification Les circuit électrique

Les indicateurs de gravité « G », de fréquence « F » et de non-détection « D » sont choisis selon leurs influences, par des critères identifiés dans les tableaux ci-dessous, alors que l'indicateur de criticité « C » est calculé par le produit des trois indicateurs précédents :

$$C = G \times F \times D$$

- **Gravité « G » :**

L'évaluation de la gravité est prise selon le tableau suivant :

Tableau 08 : critère de gravité « G »

1	Temps d'arrêt < 1 heure
2	1 heure < Temps d'arrêt < 3 heures
3	3 heures < Temps d'arrêt < 7 heures
4	Temps d'arrêt > 7heures

- **Fréquence « F » :**

La fréquence est évaluée à l'aide du critère suivant :

Tableau 09 : Critère de fréquence « F »

1	Arrivé 1 fois /an
2	Arrivé plus d'une fois /an
3	Arrivé 1 fois / mois
4	Arrivé fréquemment

- **Non-détection « D » :**

La non-détection pris son évaluation du tableau ci-dessous :

Tableau 10 : Critère de non-détection « D »

1	Détection certaine
2	Délectable par l'opérateur
3	Délectable par un technicien à l'aide d'appareillage
4	Difficilement détectable

Conclusion :

Les calculs précédents ainsi que les méthodes d'analyse appliquées nous ont permis d'obtenir une vue d'ensemble de la chaîne de production de PEHD (ligne F), en identifiant ses points faibles ainsi que les équipements responsables des perturbations de production.

Grâce à l'exploitation de l'historique des pannes, nous avons pu tirer plusieurs enseignements et formuler des décisions ciblées, accompagnées de propositions de solutions concrètes pour limiter les arrêts non planifiés.

Dans le chapitre suivant, nous poursuivrons cette étude en nous concentrant sur l'analyse de la fiabilité de la chaîne, en nous appuyant sur des modèles et calculs probabilistes.

Chapitre V :
Étude de fiabilité de La chaine de
production

Introduction :

Les diagnostics et statistiques précédemment présentés permettent de segmenter les différents secteurs de la chaîne selon leur niveau de priorité et de déterminer, de manière générale, les types d'actions à entreprendre. Toutefois, cette approche demeure insuffisante dans la mesure où la planification des interventions reste étroitement liée à des intervalles temporels spécifiques.

C'est pourquoi une étude de la fiabilité s'avère essentielle afin de mieux comprendre le comportement des équipements dans le temps. Elle permet d'élaborer des calendriers d'intervention optimisés, réduisant ainsi les coûts et les efforts, notamment en évitant les interventions prématurées ou retardées, souvent sources de gaspillage.

La fiabilité globale d'une chaîne de production peut être significativement affectée par l'équipement présentant la plus faible fiabilité, généralement identifié par une fréquence de pannes plus élevée que les autres. Comme cela a été démontré dans le chapitre précédent, l'extrudeuse représente l'élément le plus critique dans la chaîne étudiée, en raison de sa fiabilité relativement faible.

Dans cette optique, le dernier chapitre est dédié à une analyse de la fiabilité de la ligne de production (F) du PEHD, à travers une étude approfondie de l'extrudeuse. Cette analyse repose sur des calculs probabilistes, appuyés par l'utilisation de logiciels spécialisés facilitant le traitement des données. Enfin, les interventions recommandées pour l'extrudeuse, telles que définies dans le tableau AMDEC, seront associées à des intervalles temporels appropriés.

1. Fiabilité :

1.1. Historique de l'équipement « Extrudeuse » :

Tableau 01 : Historique de l'extrudeuse :

Equipement	Date de Début de panne	Heures de début de panne	Date de début de réparation	Date de fin de réparation	Temps d'arrêt
Extrudeuse	16/01/2024	8:00	09/01/2024 à 09:30	09/01/2024 à 10:45	2:45:00
	08/02/2024	22:00	08/02/2024 à 22:00	09/02/2024 à 00:00	2:00:00
	25/02/2024	18:00	25/02/2024 à 18:30	25/02/2024 à 19:30	1:30:00
	29/02/2024	3:00	29/02/2024 à 03:00	29/02/2024 à 04:00	1:00:00
	21/04/2024	11:30	21/04/2024 à 15:00	21/04/2024 à 15:30	4:00:00
	29/04/2024	9:30	29/04/2024 à 14:00	29/04/2024 à 15:00	5:30:00
	30/04/2024	10:00	30/04/2024 à 10:00	30/04/2024 à 11:30	1:30:00
	22/05/2024	10:30	22/05/2024 à 10:35	22/05/2024 à 14:00	3:30:00
	02/06/2024	13:50	02/06/2024 à 14:00	02/06/2024 à 14:30	0:40:00
	02/06/2024	16:00	02/06/2024 à 16:00	02/06/2024 à 17:00	1:00:00
	18/06/2024	22:00	18/06/2024 à 22:00	18/06/2024 à 23:30	1:30:00
	03/07/2024	18:00	03/07/2024 à 17:45	03/07/2024 à 18:30	0:30:00
	11/07/2024	10:25	11/07/2024 à 11:00	11/07/2024 à 12:00	1:35:00
	11/07/2024	15:20	11/07/2024 à 16:00	11/07/2024 à 16:40	1:20:00
	18/08/2024	8:00	18/08/2024 à 09:00	18/08/2024 à 09:30	1:30:00
	20/08/2024	14:30	20/08/2024 à 14:40	20/08/2024 à 15:10	0:40:00
	22/09/2024	15:30	22/09/2024 à 15:30	22/09/2024 à 17:00	1:30:00
	06/10/2024	14:00	06/10/2024 à 11:00	06/10/2024 à 15:30	1:30:00
	29/10/2024	8:30	29/10/2024 à 15:30	29/10/2024 à 16:30	8:00:00
	02/11/2024	14:40	02/11/2024 à 15:00	02/11/2024 à 18:00	3:20:00
	05/12/2024	9:00	08/12/2024 à 09:00	08/12/2024 à 11:00	2:00:00

1.2. Calcul des temps de bon fonctionnement (TBF) :

Les Temps de Bon Fonctionnement (TBF) constituent la variable de base dans le calcul de la fiabilité. Ils représentent la durée écoulée entre deux défaillances ou arrêts successifs, observée sur une période bien définie. Cette notion est illustrée dans la figure ci-dessous :

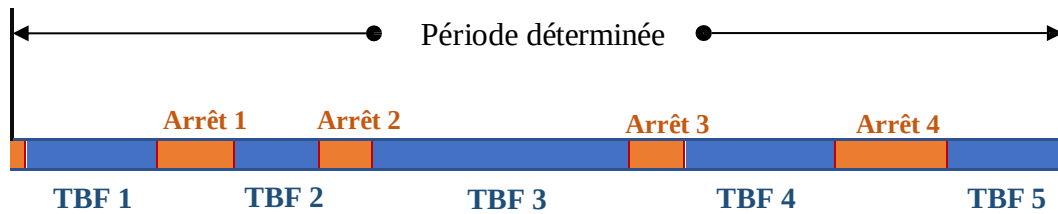


Figure 01 : illustration des TBF dans une période.

D'après cette figure, pour chaque TBF on peut déduire :

$$TBF = [Date\ du\ debut\ d'arret\ prochain] - [Date\ de\ fin\ d'arret\ precedent]$$

À l'aide de l'historique des pannes de l'extrudeuse, on peut calculer les TBF :

Tableau 02 : Temps de bon fonctionnement de l'extrudeuse :

Nombre des TBF :	TBF [h] :
1	1,5
2	3,333
3	19
4	53
5	79,5
6	94,166
7	183,916
8	186
9	263,833
10	333,5
11	354,5
12	389
13	402
14	527
15	545
16	563,25
17	783
18	792,333
19	903,333

20	1255,5
----	--------

1.3. Estimation des fonctions réelles : F(ti) et R(ti):

Comme on a déjà mentionné dans les chapitres précédents, l'estimation de la fonction de répartition réelle F(ti) se fait par une des trois méthodes d'estimation selon le nombre total des éléments dans l'échantillon N.

Dans notre cas : N=20, l'estimation est donc réalisable par la méthode des rangs médians :

$$F(t_i) = \frac{\sum ni - 0.3}{N + 0.4} \quad (V.1)$$

Pour appliquer la méthode, il est nécessaire de classer les TBF précédemment relevés par ordre croissant. Ainsi, le premier rang correspond au plus petit TBF de l'échantillon, tandis que le dernier rang est associé au TBF le plus élevé.

Le tableau suivant illustre l'application de cette méthode :

Tableau 03 : Estimation des fonctions F(ti) et R(ti)

TBF	ni	Σni	F(ti)	F(ti) %	R(ti)	R(ti) %
1,5	1	1	0,0343137	3,43%	0,9656863	96,57%
3,333	1	2	0,0833333	8,33%	0,9166667	91,67%
19	1	3	0,1323529	13,24%	0,8676471	86,76%
53	1	4	0,1813726	18,14%	0,8186275	81,86%
79,5	1	5	0,2303922	23,04%	0,7696078	76,96%
94,166	1	6	0,2794118	27,94%	0,7205882	72,06%
183,916	1	7	0,3284314	32,84%	0,6715686	67,16%
186	1	8	0,377451	37,75%	0,622549	62,25%
263,833	1	9	0,4264706	42,65%	0,5735294	57,35%
333,5	1	10	0,4754902	47,55%	0,5245098	52,45%
354,5	1	11	0,5245098	52,45%	0,4754902	47,55%
389	1	12	0,5735294	57,35%	0,4264706	42,65%
402	1	13	0,622549	62,25%	0,377451	37,75%
527	1	14	0,6715686	67,16%	0,3284314	32,84%
545	1	15	0,7205882	72,06%	0,2794118	27,94%
563,25	1	16	0,7696078	76,96%	0,2303922	23,04%
783	1	17	0,8186275	81,86%	0,1813726	18,14%
792,333	1	18	0,8676471	86,76%	0,1323529	13,24%

903,333	1	19	0,9166667	91,67%	0,0833333	8,33%
1255,5	1	20	0,9656863	96,57%	0,0343137	3,43%

1.4. Estimation de la fonction de répartition théorique F(t) :

Dans cette section, nous appliquons l'un des modèles probabilistes à l'ensemble des TBF, en formulant l'hypothèse qu'il est adapté à notre échantillon. Cette hypothèse sera par la suite testée afin d'en vérifier la validité.

Le recours à ces modèles probabilistes permet de simplifier les calculs et d'en faciliter l'interprétation.

1.4.1. Le logiciel MINITAB :

Afin d'identifier le modèle probabiliste le plus approprié aux données, d'estimer ses paramètres et de visualiser sa distribution, nous avons utilisé le logiciel MINITAB Statistical Software.

Développé initialement par le Département de statistique de l'Université de Pennsylvanie (États-Unis), MINITAB est un outil puissant dédié à l'analyse statistique. Il permet de réaliser une large gamme d'analyses, notamment les statistiques descriptives, l'analyse de corrélation et de régression (simple et multiple), l'analyse de la variance (ANOVA), les tests d'indépendance, les méthodes non paramétriques, l'analyse des séries chronologiques, l'analyse en composantes principales, l'analyse discriminante, ainsi que le contrôle statistique de la qualité et les plans d'expériences.

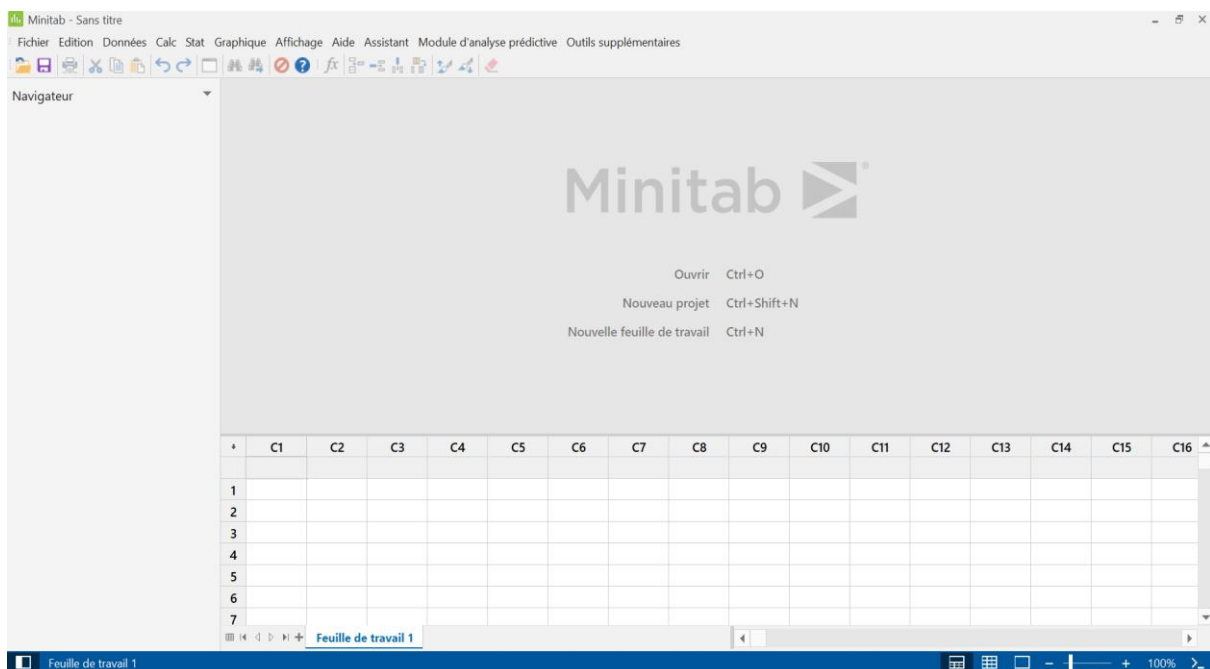


Figure 02 : Interface de logiciel MINITAB

- **Menus principaux de MINITAB :**

 Fichier :

Ce menu offre plusieurs fonctionnalités, notamment l'ouverture, l'enregistrement et la fermeture de feuilles de calcul. Il permet également d'accéder aux fenêtres graphiques, d'importer des données depuis d'autres formats de fichiers, ainsi que d'imprimer les différentes fenêtres affichées.

 Edition :

Ce menu propose des fonctions classiques des logiciels Windows : couper, copier, coller, supprimer, remplacer, annuler et tout sélectionner. Les options affichées peuvent toutefois varier selon la fenêtre active.

 Données :

Ce menu regroupe toutes les opérations sur les lignes et colonnes : tri, calculs, empilement, fractionnement, conversion de colonnes numériques en alphanumériques, etc., accessibles selon le type de données traité.

 Calc :

Le menu est divisé en quatre parties : la première traite des calculs arithmétiques et statistiques de base tels que les logarithmes et la moyenne, et comprend des options pour normaliser ou réduire les colonnes ; la seconde génère des colonnes indicées ; la troisième pour la génération de nombres aléatoires et du calcul des probabilités en fonction de distributions spécifiques ; et la dernière partie se concentre sur les calculs matriciels, tels que la transposition et les valeurs propres.

 Stat :

Ce menu est purement statistique, composé d'une section principale de 14 sous-menus qui englobent les domaines suivants :

- Statistiques élémentaires :
- Régression
- ANOVA
- DOE (Plan d'expériences)
- Carte de contrôle
- Outils de la qualité
- Fiabilité/survie
- Analyse prédictive

- Multivarié
- Série chronologique
- Tableaux
- Tests non paramétriques
- Tests d'équivalence
- Puissance et effectif de l'échantillon

Graphique :

Ce menu propose une large variété de représentations graphiques : nuages de points, diagrammes de séries temporelles, histogrammes, boîtes à moustaches, camemberts, ainsi que des graphiques en trois dimensions.

Aide :

Les utilisateurs peuvent accéder aux informations à partir du menu d'aide via une table des matières ou en recherchant des mots-clés. De plus, il existe une compilation des questions fréquemment posées et des instructions utilisées. [39]

1.4.2. Le modèle le plus adapté :

Après avoir importé les données TBF sous MINITAB, nous avons comparé les diagrammes de probabilité afin de choisir le plus ajustée aux données.

Selon [41] et [40], qui ont introduit qu'il est préférable d'utiliser la méthode d'estimation : « Moindres carrés (temps de défaillance X sur rang Y »

(En anglais : *LSXY estimates*) avec les échantillons de petite et moyenne taille.

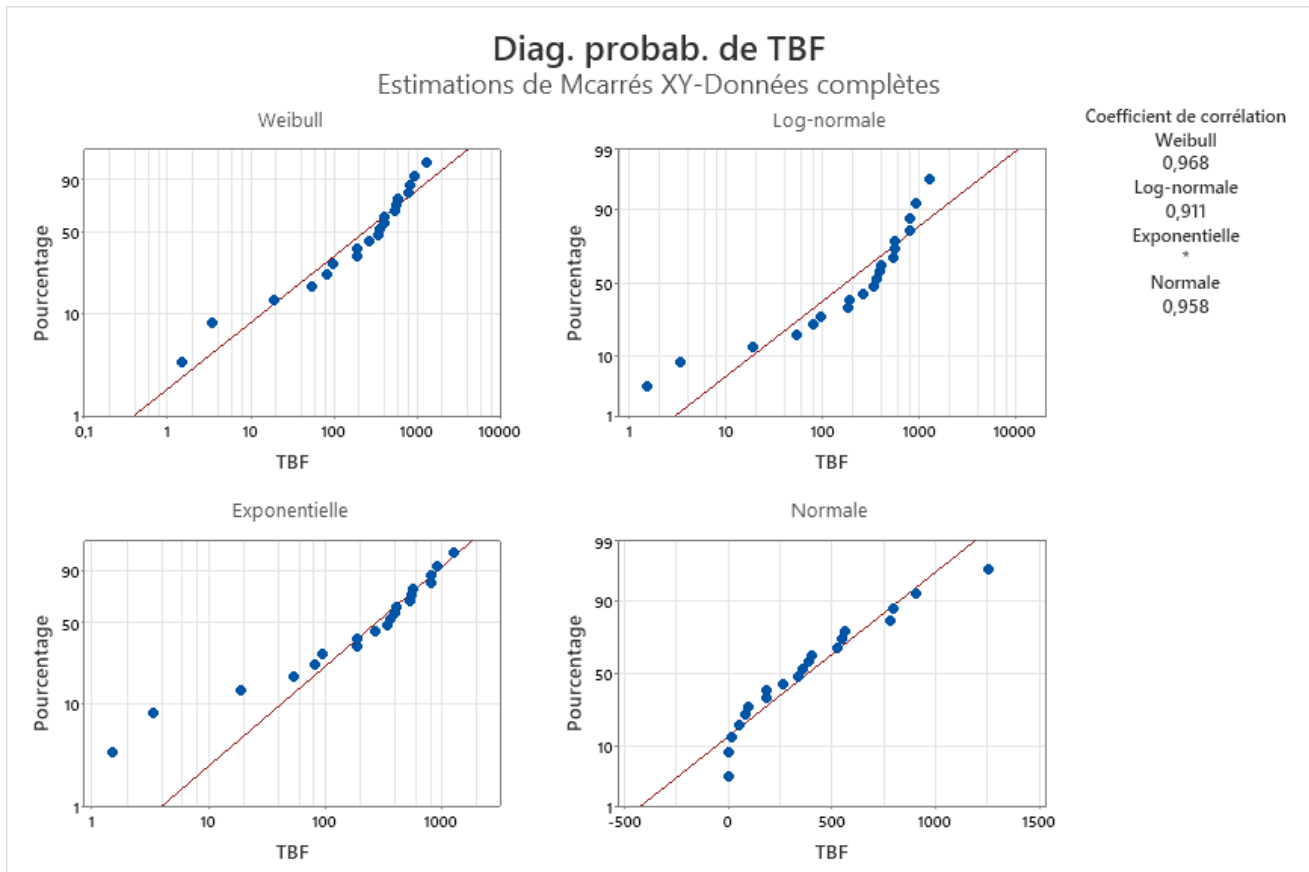


Figure 03 : résultat de comparaison entre les diagrammes

❖ Interprétation :

D'après les résultats obtenus, le coefficient de corrélation de la distribution de Weibull à 3 paramètres est de 0,968 alors que de la distribution log-normale et normale sont respectivement 0,911 et 0,958 : comme première considération, La distribution de Weibull semble la mieux adaptée à nos données, car elle présente le coefficient de corrélation le plus élevé parmi les distributions testées.

Cette hypothèse est vérifiée à l'aide du test d'Anderson-Darling, dont les résultats suivent :

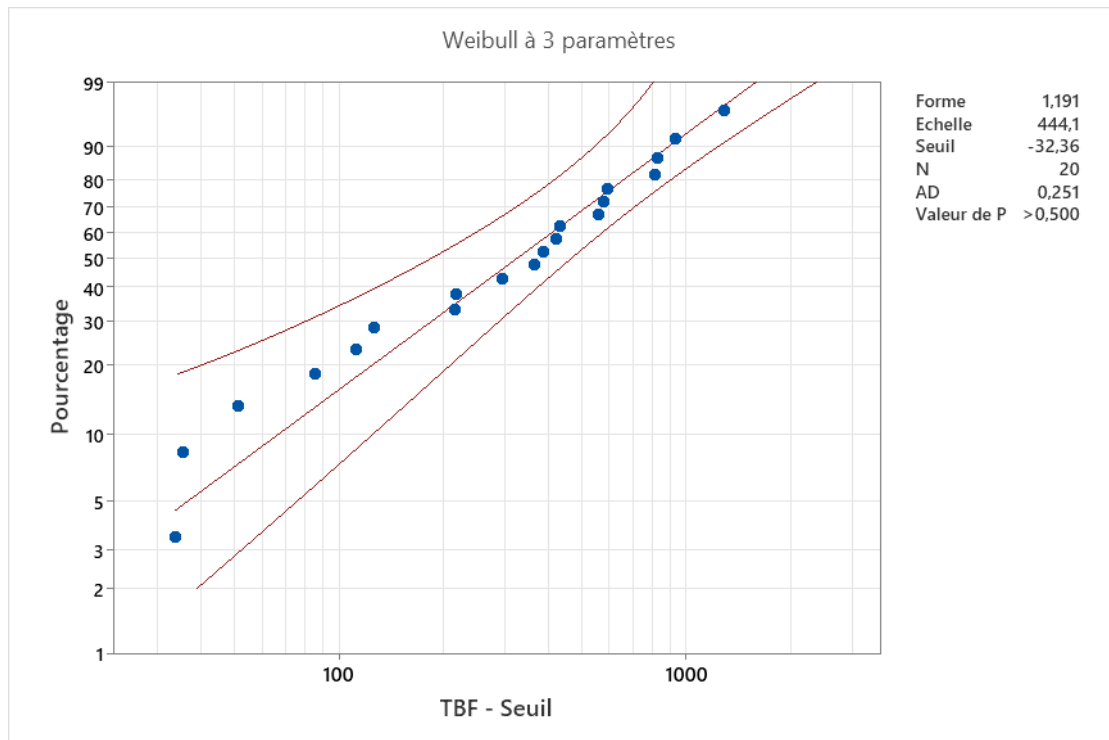


Figure 04 : Test d'Anderson-Darling et valeur P de distribution Weibull à 3 paramètres

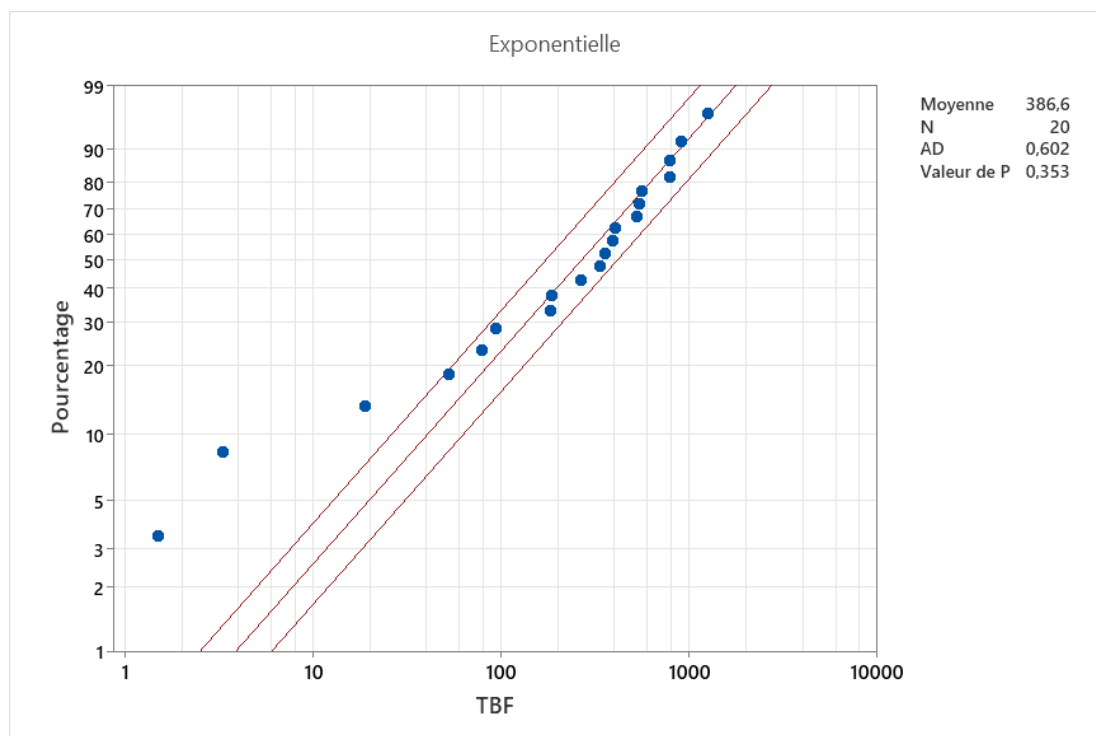


Figure 05 : Test d'Anderson-Darling et valeur P de distribution exponentielle

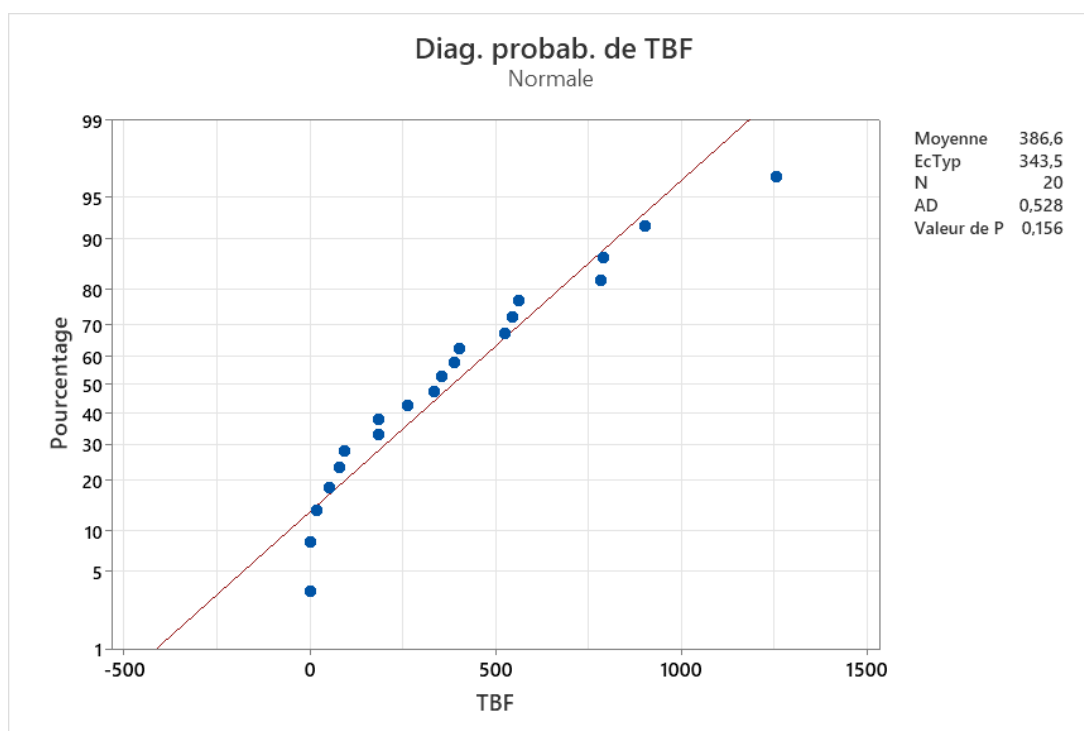


Figure 06 : Test d'Anderson-Darling et valeur P de distribution normale

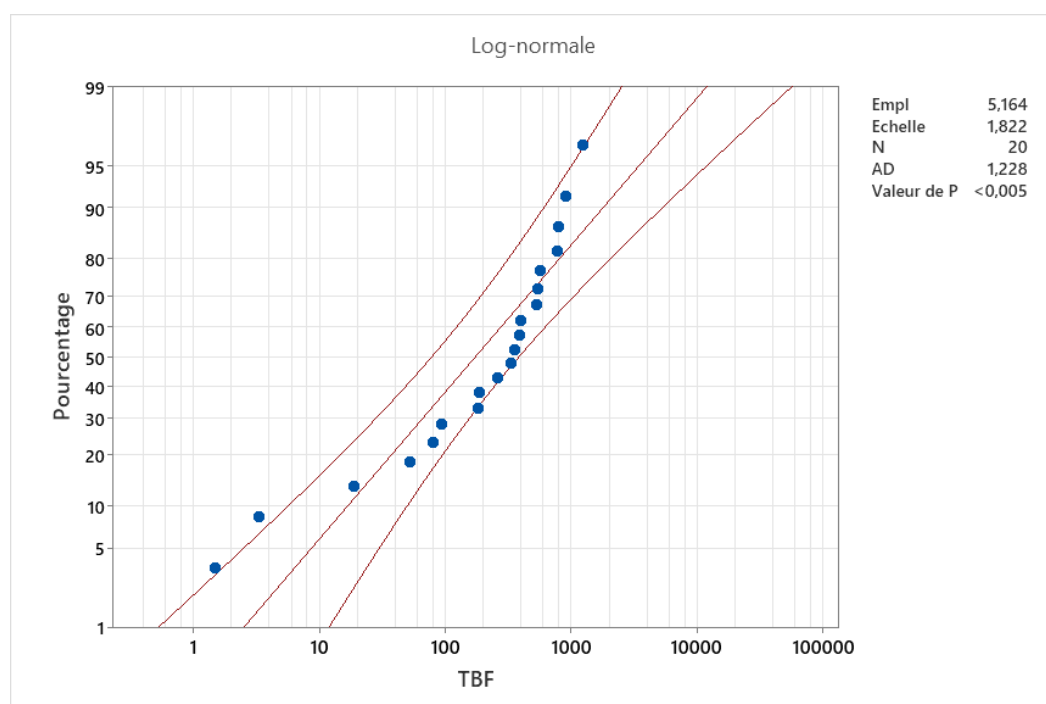


Figure 07 : Test d'Anderson-Darling et valeur P de distribution log-normale

Selon la référence [42] :

Pour la distribution log-normale : non seulement la valeur d'AD est grande par rapport aux autres distributions ainsi que la valeur $P < 0,005$, la distribution ne vérifie pas l'hypothèse donc elle est rejetée.

Pour la distribution normale : elle a une bonne valeur de P ainsi que la valeur d'AD mais elle est moins précise que le reste des distributions.

Weibull à 3 paramètres et exponentielle : les valeurs AD sont proches et les deux vérifient l'hypothèse mais $P > 0,500$ pour Weibull et $P = 0,353$ pour exponentielle ; on favorise la plus grande valeur entre eux. [42]

Alors la distribution de Weibull est la plus adaptée à notre cas.

1.4.3. Estimation de F(t) par le modèle de Weibull :

Les paramètres obtenus de la loi de Weibull sont :

- $\beta = 0,982539$
- $\eta = 427,945$
- $\gamma = -20,3568$

Analyse de répartition : TBF

Variable : TBF

troncature

Informations de troncature	Dénombrement
Valeur non tronquée	20

Méthode d'estimation : moindres carrés (moment de défaillance(X) sur rang(Y))

Loi : Weibull 3 paramètres

Estimations des paramètres

Paramètre	Estimation
Forme	0,982539
Echelle	427,945
Seuil	-20,3568

Figure 08 : Paramètres estimés du modèle Weibull

À travers ces paramètres et la relation ci-dessous, on peut estimer la fonction de répartition $F(t)$ théorique :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (V.2)$$

Les valeurs se trouvent dans le tableau suivant :

Tableau 04 : Valeurs estimées de $F(t)$ théorique par modèle de Weibull

Rang	TBF [h]	F(t)
1	1,5	0,052375159
2	3,333	0,056563538
3	19	0,091426926
4	53	0,162033667
5	79,5	0,212857102
6	94,166	0,239547925
7	183,916	0,383402033
8	186	0,386383151
9	263,833	0,487699467
10	333,5	0,563786619
11	354,5	0,58437604
12	389	0,61607423
13	402	0,627369632
14	527	0,720163797
15	545	0,731442164
16	563,25	0,742407178
17	783	0,843814697
18	792,333	0,847089686
19	903,333	0,881118523
20	1255,5	0,946336885

1.4.4. Test de Kolmogorov-Smirnov :

Avant de poursuivre le calcul des fonctions restantes, nous appliquons le test de Kolmogorov-Smirnov de manière analytique, afin de confirmer l'adéquation du modèle de Weibull à notre cas d'étude, en nous appuyant sur la table fournie en annexe. Tout d'abord les écarts « D_n » entre $F(t)$ et $F(t_i)$ sont montrés sur le tableau suivant :

Tableau 05 : Calcul d'écart entre $F(t)$ et $F(t_i)$

Rang	TBF [h]	$F(t)$	$F(t_i)$	$D_n= F(t)-F(t_i) $
1	1,5	0,052375159	0,0343137	0,018061459
2	3,333	0,056563538	0,0833333	-0,026769762
3	19	0,091426926	0,1323529	-0,040925974
4	53	0,162033667	0,1813726	-0,019338933
5	79,5	0,212857102	0,2303922	-0,017535098
6	94,166	0,239547925	0,2794118	-0,039863875
7	183,916	0,383402033	0,3284314	0,054970633
8	186	0,386383151	0,377451	0,008932151
9	263,833	0,487699467	0,4264706	0,061228867
10	333,5	0,563786619	0,4754902	0,088296419
11	354,5	0,58437604	0,5245098	0,05986624
12	389	0,61607423	0,5735294	0,04254483
13	402	0,627369632	0,622549	0,004820632
14	527	0,720163797	0,6715686	0,048595197
15	545	0,731442164	0,7205882	0,010853964

16	563,25	0,742407178	0,7696078	-0,027200622
17	783	0,843814697	0,8186275	0,025187197
18	792,333	0,847089686	0,8676471	-0,020557414
19	903,333	0,881118523	0,9166667	-0,035548177
20	1255,5	0,946336885	0,9656863	-0,019349415

Sachant que :

n = 20 : le nombre des éléments dans l'échantillon.

$\alpha = 0.05$: l'erreur statistique

D'après le tableau précédent, **$D_{20, \max} = 0,088296419$**

En utilisant la table de Kolmogorov-Smirnov : **$D_{20,0.05} = 0,294$**

Par comparaison :

$D_{20, \max} < D_{20, 0.05}$; Alors le modèle de Weibull est acceptable.

1.4.5. Fonction de fiabilité théorique $R(t)$, le taux de défaillance $\lambda(t)$ et densité de probabilité $f(t)$:

La fiabilité est calculée par la relation :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (V.3)$$

Ou bien :

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (V.4)$$

Le taux de défaillance par :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (V.5)$$

Alors que la densité de probabilité par :

$$f(t) = \lambda(t).R(t) \quad (V.6)$$

Tableau 06 : Estimation des fonctions $R(t)$, $\lambda(t)$ et $f(t)$

N°	TBF [h] :	$R(t)$	$\lambda(t)$	$f(t)$
1	1,5	0,947624841	0,002409145	0,002282965
2	3,333	0,943436462	0,00240578	0,002269700
3	19	0,908573074	0,002384651	0,002166629
4	53	0,837966333	0,002358946	0,001976717
5	79,5	0,787142898	0,002346307	0,001846879
6	94,166	0,760452075	0,002340712	0,001779999
7	183,916	0,616597967	0,002317222	0,001428795
8	186	0,613616849	0,002316812	0,001421635
9	263,833	0,512300533	0,002303922	0,001180300
10	333,5	0,436213381	0,002295131	0,001001167
11	354,5	0,41562396	0,002292825	0,000952953
12	389	0,38392577	0,002289308	0,000878924
13	402	0,372630368	0,00228806	0,000852601
14	527	0,279836203	0,00227774	0,000637394
15	545	0,268557836	0,002276455	0,000611360
16	563,25	0,257592822	0,002275194	0,000586074
17	783	0,156185303	0,002262549	0,000353377
18	792,333	0,152910314	0,002262094	0,000345897
19	903,333	0,118881477	0,002257049	0,000268321
20	1255,5	0,053663115	0,00224437	0,000120440

1.4.6. Représentation graphique des fonctions et interprétations :

- Fonction de défaillance $F(t)$:

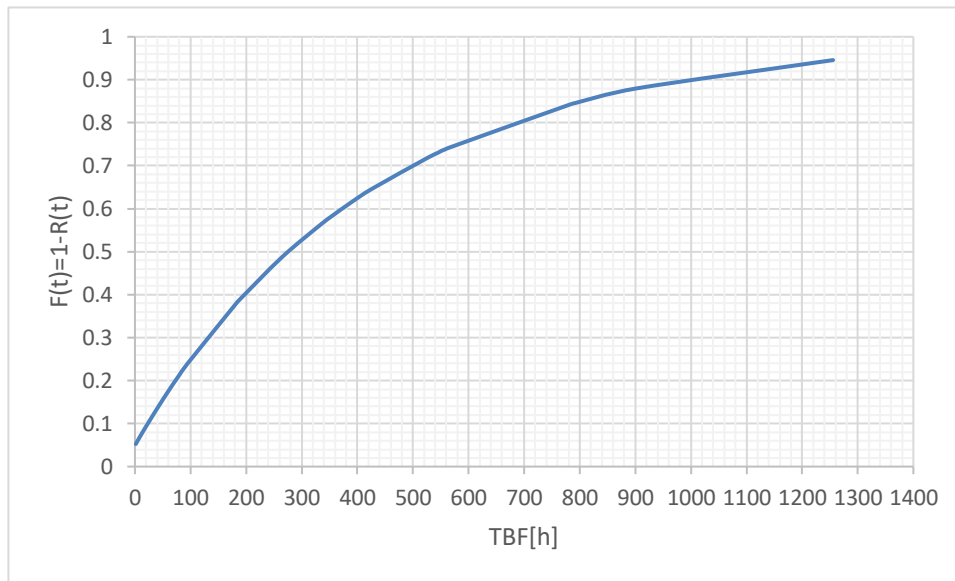


Figure 09 : courbe de fonction de défaillance $F(t)$

La figure ci-dessus illustre la fonction de répartition (ou fonction de défaillance) $F(t)$ en fonction des temps de bon fonctionnement (TBF). On observe que $F(t)$ croît proportionnellement à l'augmentation du temps de bon fonctionnement.

- Fonction de fiabilité $R(t)$:

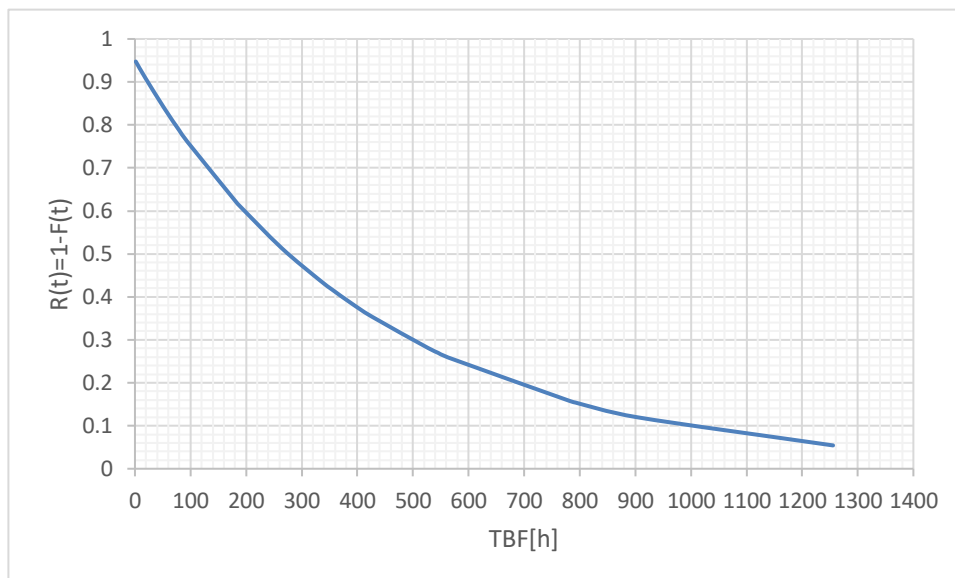


Figure 10 : courbe de fiabilité $R(t)$

Cette figure présente la courbe de la fonction de fiabilité $R(t)$, qui est complémentaire de la fonction de défaillance $F(t)$. Elle décroît proportionnellement à l'augmentation du temps de bon fonctionnement.

- Fonction de taux de défaillance $\lambda(t)$:

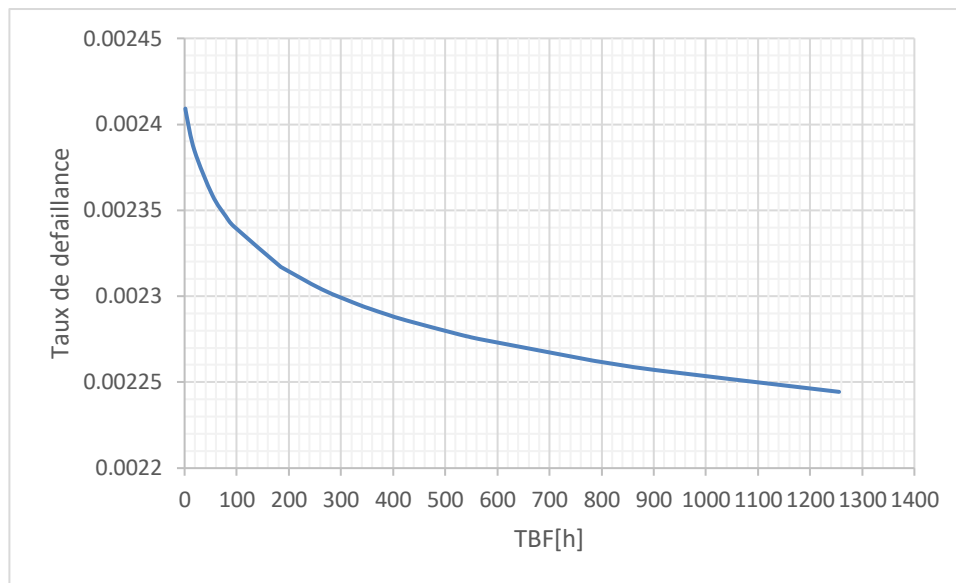


Figure 11 : Courbe de taux de défaillance

La courbe du taux de défaillance est représentée sur la figure, on remarque un taux de défaillance progressivement décroissant, avec un paramètre de forme inférieur à 1, donc on est dans la première phase de la courbe en baignoire « jeunesse ». Cette décroissance est relative au disparition des imperfections de fabrication petit à petit jusqu'à atteindre la période de maturité et le régime permanent.

- Fonction de densité $f(t)$:

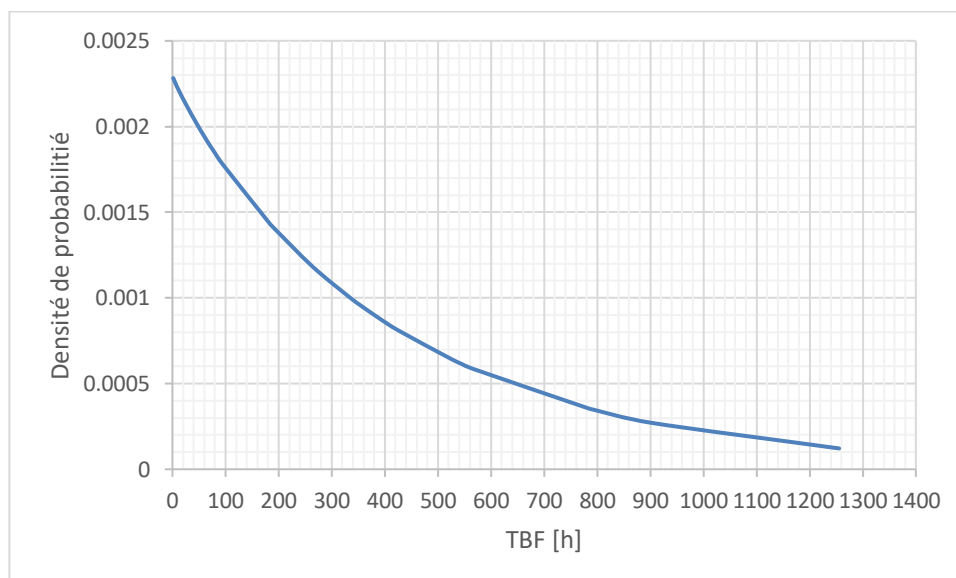


Figure 12 : Courbe de densité de probabilité

La courbe dans la figure précédente, est un bon indice de la distribution des défaillances au cours des temps de bons fonctionnements, on constate qu'elle est strictement décroissante et homogène avec le comportement de $F(t)$ et $R(t)$.

1.4.7. Calcul en fonction de la MTBF :

- **MTBF :**

Le paramètre MTBF est calculé à l'aide de la valeur $A=1,0234$ équivalente à $\beta=0,95$ (obtenue du tableau -02- en annexe) ; Où :

$$MTBF = A \times \eta + \gamma \quad (V.7)$$

$$MTBF = 1,0234 \times 427,945 - 20,3568 = 458,315h$$

D'après MTBF on peut donc déduire λ :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \Rightarrow \lambda = 0,00218 \text{ panne/heure}$$

- **Fonction de fiabilité R (MTBF) :**

$$R(MTBF) = e^{-\left(\frac{MTBF-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \Rightarrow R(MTBF) = e^{-\left(\frac{458,315+20,3568}{427,945}\right)^{0,982539}}$$

$$\Rightarrow R(MTBF) = 0,3275 = 32,75 \%$$

- **Fonction de défaillance F(MTBF) :**

$$F(MTBF) = 1 - R(MTBF) \Rightarrow F(MTBF) = 1 - 0,3275 = 67,25\%$$

- **Fonction de taux de défaillance λ (MTBF) :**

$$\lambda(MTBF) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{MTBF-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \Rightarrow \lambda(MTBF) = \frac{0,982539}{427,945} \left(\frac{458,315+20,3568}{427,945}\right)^{0,982539-1}$$

$$\Rightarrow \lambda(MTBF) = 0,002291 \text{ panne/heure}$$

- **Fonction densité de probabilité f (MTBF) :**

$$f(MTBF) = \lambda(MTBF) \times R(MTBF) \Rightarrow f(MTBF) = 7,50 \times 10^{-4}$$

2. Maintenabilité :

La maintenabilité $M(t)$ d'un bien peut être exprimée par l'expression :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (V.8)$$

Où : μ est le taux de réparation calculé à travers le MTTR par la relation :

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (V.9)$$

Sachant que : MTTR est le temps moyen de réparation, déduit par la somme des temps de réparation TTR et le nombre des réparations N:

$$MTTR = \frac{\Sigma TTR}{N} \quad (V.10)$$

Dans notre cas $\Sigma TTR = 30,083$ heures dans 21 interventions.

Donc : $MTTR = 1,43$ heure / intervention

Avec un taux de réparation $\mu = 0,698$

Le tableau suivant contient les différentes valeurs de la maintenabilité $M(t)$:

Tableau 07 : Différentes valeurs de la maintenabilité en fonction des TTR

Nombre	TTR [h]	M(t)
1	0,5	0,29460687
2	0,5	0,29460687
3	0,5	0,29460687
4	0,5	0,29460687
5	0,667	0,372074238
6	0,75	0,407556637
7	1	0,502420532
8	1	0,502420532
9	1	0,502420532
10	1	0,502420532
11	1	0,502420532
12	1	0,502420532
13	1,25	0,582094521
14	1,5	0,649010861
15	1,5	0,649010861
16	1,5	0,649010861

17	2	0,752414673
18	2	0,752414673
19	3	0,876806625
20	3,4167	0,907895671
21	4,5	0,956760463

La figure ci-dessous est une représentation graphique de l'évolution de la maintenabilité en fonction des temps de réparation TTR.

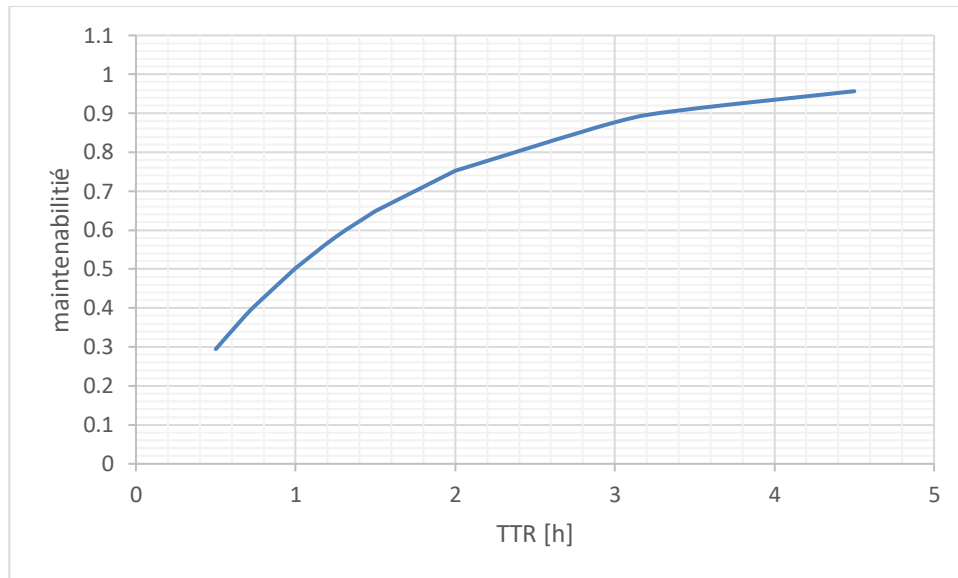


Figure 13 : Courbe de la maintenabilité

On remarque une augmentation remarquable au fur et à mesure d'augmentation des temps de réparation TTR.

3. Disponibilité :

3.1. Disponibilité intrinsèque :

S'exprime par l'expression :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (V.11) \quad \Rightarrow \quad D = 0,99$$

3.2. Disponibilité instantanée :

Elle est donnée en fonction de $\lambda(t)$ et $\mu(t)$ par la relation :

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu + \nu} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda + \mu)TTR} \quad (V.12)$$

Le tableau suivant contient les différentes valeurs de la disponibilité $D(t)$:

Tableau 08 : Différentes valeurs de $D(t)$ en fonction des TTR

Nombre	TTR [h]	$D(t)$
1	0,5	0,999080353
2	0,5	0,999080353
3	0,5	0,999080353
4	0,5	0,999080353
5	0,667	0,998838713
6	0,75	0,998728065
7	1	0,998432348
8	1	0,998432348
9	1	0,998432348
10	1	0,998432348
11	1	0,998432348
12	1	0,998432348
13	1,25	0,998184117
14	1,5	0,997975747
15	1,5	0,997975747
16	1,5	0,997975747
17	2	0,997654015
18	2	0,997654015
19	3	0,997267575
20	3,4167	0,997171152
21	4,5	0,997019826

La figure suivante représente la courbe de disponibilité $D(t)$:

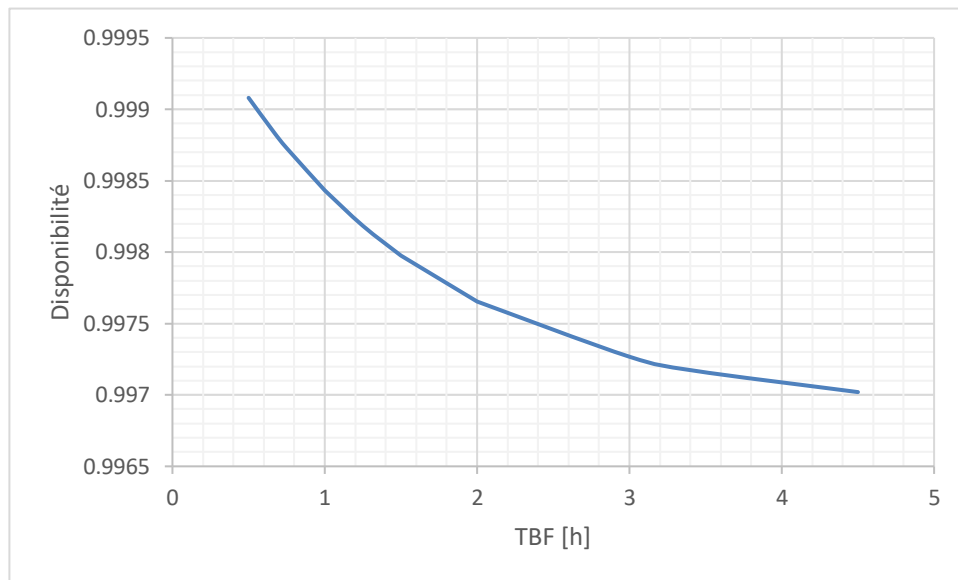


Figure 14 : Courbe de disponibilité instantanée $D(t)$

La courbe présentée montre que la disponibilité $D(t)$ de la chaîne diminue proportionnellement à l'augmentation des temps de réparation TTR.

4. Propositions des échéanciers pour une maintenance systématique :

La loi de fiabilité $R(t)$ du modèle de Weibull nous permet de calculer des échéanciers pour l'intervention systématique par :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \Rightarrow T = \eta(-\ln R(t))^{\frac{1}{\beta}} + \gamma \quad (V.13)$$

Selon la valeur de $R(t)$ souhaitée, on donne des différents intervalles temporels d'interventions :

Tableau 09 : Temps systématique pour faire une intervention

R(t) :	50%	60%	70%	80%	90%
Intervalle pour intervention [heures] :	274,35	195,65	129,50	72,62	22,96

Selon le tableau, le pourcentage de fiabilité $R(t)$ souhaité dépend directement de l'intervalle d'intervention systématique.

Exemple : Pour maintenir une fiabilité de 50 % de l'extrudeuse, il est nécessaire d'intervenir systématiquement, selon les actions définies dans le tableau AMDEC, toutes les **274,35 heures**.

Conclusion :

L'étude de fiabilité menée à l'aide du modèle de Weibull a permis de déterminer les paramètres essentiels à l'analyse du comportement de l'extrudeuse. Les résultats indiquent que cette dernière se situe dans la phase de jeunesse de la courbe en baignoire, caractérisée par une diminution progressive du taux de défaillance.

Par ailleurs, les calculs de maintenabilité révèlent une gestion efficace du personnel, qui a su limiter les temps d'indisponibilité en intervenant de manière réactive.

Cependant, cette approche reste principalement corrective, avec une absence notable de maintenance préventive. Pour pallier cette lacune, des actions préventives spécifiques ont été proposées, accompagnées d'un échéancier d'interventions systématiques, afin d'assurer une fiabilité durable de l'équipement.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans le cadre de ce projet, notre objectif principal était d'étudier la fiabilité de la chaîne de production (ligne F) des tubes PEHD au sein de l'entreprise CHIALI TUBES. Cette étude visait à évaluer l'état actuel de la chaîne et de ses équipements, en vue d'identifier les actions de maintenance nécessaires pour en améliorer la performance.

Ce mémoire s'articule autour de deux axes majeurs : une partie théorique et une partie pratique.

Dans la première partie, nous avons exposé les fondements théoriques de la fiabilité et de la maintenance, en détaillant les principales méthodes d'analyse ainsi que les lois statistiques utilisées. Une description complète de la chaîne de production PEHD a également été présentée, mettant en lumière le rôle et le fonctionnement de chaque équipement.

La seconde partie a été consacrée à l'analyse des pannes de la ligne F, dans le but d'évaluer trois indicateurs clés : la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité. Cette démarche a débuté par un diagnostic approfondi, basé sur des méthodes d'analyse statistiques, pour identifier les équipements critiques ayant un impact notable sur la performance globale.

Pour affiner l'évaluation de la fiabilité, nous avons appliqué le modèle de Weibull, à l'aide du logiciel MINITAB, ce qui nous a permis d'estimer les paramètres caractéristiques du comportement de défaillance des équipements. Les résultats obtenus ont permis de mieux comprendre l'état des machines et de définir une politique de maintenance plus adaptée à la situation réelle de la chaîne.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] HAMAIDA, M. E. H. (2021). *Mise en place d'un système de maintenance Etude de cas: Société MOULINS HAMAMAT* (Doctoral dissertation, Directeur: M. Housseyn KAHOUADJI/Co-directeur: M. Fouad MALIKI).
- [2] X60-319/NF13306, « Terminologie de la maintenance »,2010, AFNOR
- [3] X60-010/NF, « Niveaux de maintenance » ,1994, AFNOR
- [4] X60-020/NF, « Indicateurs de maintenance », 1995, AFNOR
- [5] X60-000/FD, « Types de maintenance », AFNOR
- [6] Debbah,Y. « *Gestion de la maintenance, Chapitre 01 : Maintenance Industrielle* »,ISTA d'Université des frères Mentouri-Constantine 01-
- [7] Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Elsevier.
- [8] Yang, S. K. (2003). A condition-based failure-prediction and processing-scheme for preventive maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 52(3), 373-383.
- [9] Cai, Z., Sun, S., Si, S., & Wang, N. (2009, October). Research of failure prediction Bayesian network model. In *2009 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 2021-2025). IEEE.
- [10] Nguyen, Kim-Anh. (2015). *Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe*.
- [11] Bouami, D. (2019). *Le grand livre de la maintenance: concepts, démarches, méthodes, outils et techniques*. Afnor.
- [12] Monchy, F., & Vernier, J. P. (2010). *Maintenance-3e éd.: Méthodes et organisations*. Hachette.
- [13] CHEIKHI, O. (2018). *Amélioration des performances opérationnelles des systèmes de production en utilisant la théorie des chaînes de Markov* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-Msila).

- [14] FAID, O. (2018). *Optimisation de la fiabilité d'un système électromécanique* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-Msila).
- [15] HATHAT, A., & DEBLAOU, H. *étude analytique fdm d'une turbine dr990* (Doctoral dissertation).
- [16] X06-501/NF, « Application of statistics. Initiation into reliability »
- [17] Villemeur, A. (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité-facteurs humains, informatisation.
- [18] BE, P. A., BELEULMI, A. S., & BELLAOUAR, P. A. COURS DE FIABILITE MAINTENABILITE DISPONIBILITE.
- [19] Antonio, P. C. G., Jean-François, A., Julien, M., & Nicolae, B. SIMULATION DE MONTE CARLO POUR LA FIABILITE DYNAMIQUE PRENANT EN COMPTE LE VIEILLISSEMENT DES COMPOSANTS MONTE CARLO SIMULATION FOR DYNAMIC RELIABILITY TAKING INTO ACCOUNT COMPONENTS AGEING.
- [20] Tebbi, O. (2005). *Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés* (Doctoral dissertation, Université d'Angers).
- [21] KAHAL, H. (2013). *Réseaux Bayésiens Dynamiques : Application aux réseaux électriques* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf d'Oran).
- [22] Website : <https://perso.univ-rennes1.fr/helene.guerin/enseignement/MSB/varBio.pdf>
- [23] Bon, J. L. (1995). Fiabilité des systemes: Méthodes mathématiques. (No Title).
- [24] Leemis, L. M. (1995). *Reliability: probabilistic models and statistical methods*. Prentice-Hall, Inc.
- [25] Zohra, B. (2008). Méthodologie d'évaluation de maintenance pour les systèmes de production. *Mémoire de magistère, ENSET*.

- [26] CABAU, E. (1999). Introduction à la conception de la sûreté. *Cahier technique Schneider Electric*, (144), 28.
- [27] Goble, W. M. (1998). Control Systems Safety Evaluation and Reliability, ISA, ISBN# 1-55617-636-8. *Reference on FMEDA methods Failure rate calculations*, 3.
- [28] X60-500/NF « Terminologie relative à la fiabilité-maintenabilité-disponibilité », 1988, AFNOR
- [29] Mohammed, K. A. D. I., & Eddine, G. D. *Etude et Amélioration FMD D'une Motopompe Centrifuge* (Doctoral dissertation).
- [30] <https://www.groupe-chiali.com>
- [31] SAHOULI, N. E., & BENDJELLOUL, Y. *Impact d'une démarche Lean Six Sigma pour la résolution de problèmes en entreprise Cas d'étude: Entreprise CHIALI Tubes* (Doctoral dissertation).
- [32] *Tatamoniaina, LANTOARIMANANA. Mémoire de fin d'études. ETUDE ET CONCEPTION D'UNE EXTRUDEUSE. UNIVERSITE D'ANTANANARIVO. 2003.*
- [33] Lockyer, K. (1974). *Guide de la gestion des stocks:(stock control a pratical approach)*. Traduit de l'anglais par gilles de monteynard. Éditions d'Organisation.
- [34] Mohammed, B., & Amar, F. T. (2004). Les outils de gestion.
- [35] Rais, S., Traore, I., Alaoui, M., & Dadda, M., « *Diagramme d'ISHIKAWA :Causes à effets* », Ecole national de commerce et de gestion, Oujda
- [36] Image diagramme : <https://www.manager-go.com/assets/Uploads/causes-effet2.png>
- [37] Hergon, E., Crespeau, H., & Rouger, P. (1994). Modes de défaillance du processus transfusionnel. Intérêt de l'analyse prévisionnelle de sûreté de fonctionnement. *Transfusion Clinique et Biologique*, 1(5), 379-386.
- [38] BOUSSEROUEL, M., & BENKADDOUR, S. E. *Application de la méthode AMDEC afin d'établir un plan de maintenance dédié à un système de production. Cas: Système MPS 500 du laboratoire MELT* (Doctoral dissertation).

- [39] Besbas, I., & Achour, H. (2020). *Estimation de la fiabilité en vue d'une maintenance prédictive*, IMSI Université Med Ben Ahmed d'Oran
- [40] <https://www.scribd.com/doc/251561859/Barringer-Kuwait-1-pdf>
- [41] [Life Data Analysis of Right Censored data using Minitab Software \(revised video\) - YouTube](#)
- [42] <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/20/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/how-to/individual-distribution-identification/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/goodness-of-fit/>

Annexes

- **Annexe 01** : Table de KOLMOGOROV-SMIRNOV [15]

N	Niveau significatif				
	0,2	0,15	0,1	0,05	0,01
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,828
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,733
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,252	0,274	0,295	0,328	0,392
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,381
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,371
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,363
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
>35	$\frac{1,07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{N}}$	$\frac{0,188}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{N}}$

- **Annexe 02** : Table de distribution de Weibull : Coefficient A et B en fonction de β
[15]

β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,2	120	1 901	1,5	0,9027	0,613	4	0,9064	0,254
0,25	24	199	1,55	0,8994	0,593	4,1	0,9077	0,249
0,3	92,625	50,08	1,6	0,8966	0,574	4,2	0,9086	0,244
0,35	5,291	19,98	1,65	0,8942	0,556	4,3	0,9102	0,239
0,4	33,234	10,44	1,7	0,8922	0,54	4,4	0,9146	0,235
0,45	24,686	6,46	1,75	0,8906	0,525	4,5	0,9125	0,23
0,5	2	4,47	1,8	0,8893	0,511	4,6	0,9137	0,226
0,55	17,024	3,35	1,85	0,8882	0,498	4,7	0,9149	0,222
0,6	1,546	2,65	1,9	0,8874	0,486	4,8	0,916	0,218
0,65	13,663	2,18	1,95	0,8867	0,474	4,9	0,9171	0,214
0,7	12,638	1,85	2	0,8862	0,463	5	0,9162	0,21
0,75	11,906	1,61	2,1	0,8857	0,443	5,1	0,9192	0,207
0,8	1,133	1,43	2,2	0,8856	0,425	5,2	0,9202	0,203
0,85	1,088	1,29	2,3	0,8859	0,409	5,3	0,9213	0,2
0,9	10,522	1,17	2,4	0,8865	0,393	5,4	0,9222	0,197
0,95	1,0234	1,08	2,5	0,8873	0,38	5,5	0,9232	0,194
1	1	1	2,6	0,8882	0,367	5,6	0,9241	0,191
1,05	0,9803	0,934	2,7	0,8893	0,355	5,7	0,9251	0,186
1,1	0,9649	0,878	2,8	0,8905	0,344	5,8	0,926	0,165
1,15	0,9517	0,83	2,9	0,8919	0,334	5,9	0,9269	0,183
1,2	0,9407	0,787	3	0,893	0,316	6	0,9277	0,18
1,25	0,99314	0,75	3,1	0,8943	0,325	6,1	0,9266	0,177
1,3	0,9236	0,716	3,2	0,8957	0,307	6,2	0,9294	0,175
1,35	0,917	0,667	3,3	0,897	0,299	6,3	0,9302	0,172
1,4	0,9114	0,66	3,4	0,8984	0,292	6,4	0,931	0,17
1,45	0,9067	0,635	3,5	0,8997	0,285	6,5	0,9316	0,168
1,5	0,9027	0,613	3,6	0,9011	0,278	6,6	0,9325	0,166
1,55	0,8994	0,593	3,7	0,9025	0,272	6,7	0,9335	0,163
1,6	0,8966	0,574	3,8	0,9083	0,266	6,8	0,934	0,161
1,65	0,8942	0,556	3,9	0,9051	0,26	6,9	0,9347	0,15