الجمهـوريـــة الجزائـــريـــة الديمقـــراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعـلـيـــم العـــالـــي والبـحـــث العـلـمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département De Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance des Automatismes en Instrumentation

Thème

Élaboration d'un plan de maintenance préventive basé sur la criticité des équipements en industrie agroalimentaire

Cas industriel : TRÈFLE (SPA LAITRIE SIDI SAADA), RELIZANE

Présenté et soutenu publiquement par :

Fouad Benchaa et Oussama Berrached

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Arbi Maachia	MCB	IMSI-Université D'Oran 2	**Président**
TITAH Mawloud	MCA	IMSI-Université D'Oran 2	**Encadreur**
Hadj Kaddour Amel	MCB	IMSI-Université D'Oran 2	**Examinateur**

Année 2025/2026

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à Commençant par ma Chère Mère et mon Chère Père qui m'ont soutenu et aidé tout le long de mon parcours
A mes Frères et sœurs A tous les membres de la famille chacun en son nom. A tous mes amis et les gens qui m'aiment. A mon binôme
BENCHAA FOUAD

BERRACHED OUSSAMA

Dédicaces

Gloire soit rendu au Dieu tout puissant, le très miséricordieux pour tous ses bienfaits dont il m'a comblé et de m'avoir donné le courage et la force pour réaliser ce modeste travail que je dédie à :

Les deux bougies qui s'allument que pour éclaircir mon chemin : Mes très chers parents.

A mes frères et sœurs et amies.

A mon binôme BERRACHED OUSSAMA et mes chers amis. Dont je ne saurais citer car la liste est longue.

BENCHAA FOUAD

REMERCIEMENT

Au nom d'Allah, le Tout miséricordieux, le Très miséricordieux.

Ce n'est pas parce que la tradition exige que cette page se trouve dans ce travail, mais par ce que les gens à qui s'adressent nos remerciements les méritent vraiment.

Tout d'abord nous souhaitons avant tout remercier notre professeur Mr. **Titah Mawloud** de nous avoir donné le privilège d'encadré nos travaux, il nous a fait des suggestions et des critiques pendant cette période.

Aussi, nous tenons à présenter nos remerciements munis d'expression de reconnaissance et de considération à tous les professeurs et au cadre administratif de la faculté d'IMSI.
Enfin, je tiens à témoigner toute ma gratitude à tous ceux qui soutiennent ou aident dans ce travail.

Merci à vous tous

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Cadre théorique et concepts fondamentaux 3

1.1 Maintenance industrielle 4

1.1.1 Maintenance corrective 4

1.1.2 Maintenance préventive 5

Le choix du paramètre à surveiller dépend de celui qui reflète le mieux la détérioration des composants ou la cause des perturbations de fonctionnement **[4].** 6

1.1.3 Maintenance prédictive 7

1.2 Notions de fiabilité et sûreté de fonctionnement 8

1.2.1 Fiabilité et taux de défaillance 8

1.2.2 MTBF et MTTR 9

1.3 Analyse de criticité 10

1.3.1 Méthode AMDEC 10

1.3.2 Méthodes de classification (ABC) 11

1.4 Approches modernes de maintenance 13

1.4.1 Maintenance basée sur la fiabilité RCM / MBF 13

1.4.2 La TPM 14

1.4.3 Les méthodes multicritères 16

1.5 Les coûts s de maintenance 18

1.5.1 Les coûts directs de maintenance 19

1.5.2 Les coûts indirects de maintenance 20

1.5.3 Coûts de perte de production 20

1.5.4 Les coûts de défaillance 20

Conclusion 20

Chapitre 2 : Présentation générale de l'entreprise 21

2.1 Présentation générale de l'entreprise : 22

2.1.1 Historique et évolution : 22

2.1.2 Organisation structurelle 22

2.1.3 Gamme de produits : 24

2.2 Description du processus de production 26
2.2.1 Description des lignes de production 26
2.2.2 Contraintes techniques et sanitaires 29
2.3 Organisation du service maintenance : 31
2.3.1 Structure organisationnelle : 31
2.3.2 Politique de maintenance actuelle 31
2.3.3 Types de maintenance appliqués 32
2.3.4 Organisation du service maintenance 32
2.3.5 Indicateurs de performance existants 33
2.4 Diagnostic initial 35
2.4.1 Analyse des arrêts de production 35
2.4.2 Typologie des pannes 35
2.4.3 Identification des équipements sensibles 36
2.4.4 Conclusion 37
Chapitre 3 : Modélisation d'un indicateur de priorisation de la maintenance préventive des équipements agroalimentaires 38
3.1 Le modèle mathématique 39
3.1.1 Paramètres du modèle IPMEA 40
3.1.2 Formule mathématique de l'IPMEA 46
3.1.3 Fréquence des interventions de maintenance 47
Conclusion 48
Chapitre 4 : Application et validation du modèle IPMEA : Cas de TRÈFLE 49
4.1 Présentation du cas industriel étudié : 50
4.1.1 Présentation de l'entreprise : 51
4.1.2 Description du processus de production 51
4.2 Collecte et préparation des données 51
4.2.1 Sources des données de maintenance 51
4.2.2 Données historiques des pannes 52
4.3 Calcul de l'IPMEA pour les équipements étudiés 53
4.3.1 Classement des équipements selon leur criticité 54
4.3.2 Analyse des résultats obtenus 54
4.4 Élaboration du plan de maintenance préventive 55
4.4.1 Définition des stratégies de maintenance par niveau de criticité 55
4.4.2 Détermination des fréquences d'intervention 56

4.4.3 Affectation des actions de maintenance par équipement.....57
4.4.4 Proposition du planning préventif annuel.....63
4.5 Proposition des opérations de maintenance par famille d'équipements.....65
4.6 Évaluation technico-économique de la stratégie de maintenance basée sur l'IPMEA 65
4.6.1 Structure des coûts de maintenance 66
4.6.2 Évaluation des coûts avant l'application de l'IPMEA 66
4.6.3 Évaluation des coûts après l'application de l'IPMEA.....67
4.6.4 Calcul des gains économiques 67
4.6.5 Tableaux comparatifs des coûts 67
4.7 Analyse et interprétation des résultats IPMEA 76
4.8 Discussion.....79
LISTE DES REFERANCE 82

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Échelle de Saaty de la méthode AHP [24] 17
Tableau 1-2: Indice de cohérence moyen 18
Tableau 3-1: Les paramètres sélectionnés et leurs facteurs de pondération (R) 39
Tableau 3-2:Niveaux d'importance de critères « Fonction de l'équipement dans le procédé» 40
Tableau 3-3:Niveaux d'importance du critère « Type d'équipement agroalimentaire » 41
Tableau 3-4:Niveaux d'importance du critère «Localisation de l'équipement dans le processus » 41
Tableau 3-5Niveaux d'importance du critère « Risque de conséquence d'une défaillance » 42
Tableau 3-6: Niveaux d'importance du critère « Âge de l'équipement » 42
Tableau 3-7: Niveaux d'importance du critère « Taux d'utilisation » 43
Tableau 3-8: Niveaux d'importance du critère « Complexité de la maintenance » 43
Tableau 3-9: Niveaux d'importance du critère « Fréquence des pannes » 43
Tableau 3-10:Niveaux d'importance du critère « Coût de maintenance ou de réparation » 44
Tableau 3-11: Niveaux d'importance du critère « Causes de mise hors service » 44
Tableau 3-12: Niveaux d'importance du critère « Durée des temps d'arrêt » 45
Tableau 3-13: Niveaux d'importance du critère « Nombre d'équipements de secours disponibles » 45
Tableau 3-14: Niveaux d'importance du critère « Disponibilité de l'équipe de maintenance spécialisée » 45
Tableau 3-15: Fréquence des interventions de maintenance préventive selon l'IPMEA 47
Tableau 4-1: classement le premier 5 équipement selon leur criticité 54
Tableau 4-2: Stratégies de maintenance préventive selon le niveau de criticité IPMEA 56
Tableau 4-3: Fréquences d'intervention et répartition temporelle par niveau de criticité 57
Tableau 4-4: Affectation des actions de maintenance par équipement (classement par ordre de criticité IPMEA décroissant) 58
Tableau 4-5: Planning préventif annuel (15 équipements représentatifs par ordre de criticité) 64
Tableau 4-6: Proposition des opérations de maintenance par famille d'équipements 65
Tableau 4-7: Comparaison des coûts de maintenance avant et après IPMEA (valeurs estimatives, DA/an) 68
Tableau 4-8: Gains économiques estimatifs par équipement après implémentation du modèle IPMEA 69
Tableau 4-9: Décomposition détaillée des coûts par composante pour les équipements à criticité très élevée (valeurs estimatives, DA/an) 74

Liste des figures

Figure 1-1: Maintenance Corrective 4
Figure 1-2 : la fiabilité décroissante avec le temps [9]. 8
Figure 1-3: La présentation des différentes grandeurs en fonction du temps 9
Figure 1-4:représentation des trois zones de la courbe ABC. 12
Figure 1-5: Structure de la hiérarchie AHP 17
Figure 2-1: machine ERCA 26
Figure 2-2:Cuves de fermentation 27
Figure 2-3:souffleuse KHS 27
Figure 2-4: Étiqueteuse P.E 28
Figure 2-5: homogénéisateur 28
Figure 2-6:Structure organisationnelle de l'entreprise tréfle 31
Figure 3-1: Paramètres qualitative de modèle proposé 40
Figure 4-1: Situation géographique de la laiterie SIDI SAADA 50
Figure 4-2 : Le calcul de l'IPMEA pour les équipements étudiés sure EXEL 53
Figure 4-3:Répartition des équipements selon le niveau de priorité IPMEA 76
Figure 4-4: Classement des équipements les plus critiques (Top 10 IPMEA) 77
Figure 4-5: IPMEA moyen par zone de production 77
Figure 4-6: Contribution des critères à l'indice IPMEA 78
Figure 4-7: Corrélation entre l'âge des équipements et l'indice IPMEA 79

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la maintenance industrielle au sein du secteur agroalimentaire, où la disponibilité des équipements, la sécurité sanitaire et la continuité de production occupent une place essentielle. L'étude réalisée à la Laiterie TRÈFLE, située à Relizane, a eu pour objectif de proposer un modèle de priorisation de la maintenance préventive adapté aux spécificités de ce secteur. Pour répondre à cette problématique, un indicateur multicritère, appelé IPMEA, a été développé afin d'évaluer la criticité des équipements à partir de treize paramètres techniques, économiques, organisationnels et sanitaires. Ce modèle permet de transformer des données qualitatives et quantitatives en un indice normalisé facilitant la hiérarchisation des équipements selon leur niveau de risque.

L'application du modèle aux équipements étudiés a montré que certains actifs, notamment ceux liés à la transformation, au conditionnement et aux utilités critiques, présentent une criticité élevée et doivent bénéficier d'une attention prioritaire. Les résultats obtenus ont permis d'élaborer un plan de maintenance préventive plus rationnel, mieux adapté aux besoins réels de l'entreprise et plus cohérent avec les exigences de sécurité alimentaire. L'évaluation technico-économique a également mis en évidence un gain important, avec une réduction notable des coûts globaux de maintenance et une amélioration de la disponibilité des équipements. Ce travail confirme ainsi l'intérêt d'une maintenance basée sur la criticité comme outil d'aide à la décision dans l'industrie agroalimentaire.

الملخص

يندرج هذا العمل في إطار تحسين إدارة الصيانة الصناعية داخل قطاع الصناعات الغذائية، حيث تمثل جاهزية المعدات، والسلامة الصحية، واستمرارية الإنتاج عناصر أساسية لضمان أداء المؤسسة. وقد تم تنفيذ هذه الدراسة على مستوى مؤسسة الواقعة بولاية غليزان، بهدف اقتراح نموذج يساعد على ترتيب أولويات الصيانة الوقائية بما يتلاءم مع TRÈFLE ، يعتمد على ثلاثة عشر معيارا IPMEA خصوصيات هذا القطاع. ولتحقيق ذلك، تم تطوير مؤشر متعدد المعايير تحت اسم تقنيا واقتصاديا وتنظيميا وصحيا، قصد تقييم درجة حرجة المعدات وتحويل المعطيات النوعية والكمية إلى قيمة معيارية تسمح بترتيب المعدات حسب مستوى المخاطر.

وقد أظهرت نتائج تطبيق هذا النموذج على المعدات المدروسة أن بعض التجهيزات، خاصة المرتبطة بعمليات التحويل والتوضيب والمرافق الحيوية، تتميز بدرجة حرجة مرتفعة وتستوجب أولوية في التدخل الصياني. كما سمحت هذه النتائج بإعداد خطة صيانة وقائية أكثر عقلانية، وأكثر انسجاما مع احتياجات المؤسسة ومع متطلبات السلامة الغذائية. وأبرز التقييم التقني والاقتصادي وجود تحسن واضح، يتمثل في تخفيض معتبر في التكاليف الإجمالية للصيانة وتحسين جاهزية المعدات. وبذلك يؤكد هذا العمل أهمية اعتماد الصيانة المبنية على درجة الحرجة كأداة فعالة لدعم اتخاذ القرار في الصناعات الغذائية.

Introduction générale

Dans l'industrie agroalimentaire, la performance des équipements de production constitue un facteur essentiel pour garantir la continuité des opérations, la qualité des produits et le respect des exigences sanitaires. Une défaillance technique peut entraîner des arrêts de production, des pertes économiques importantes et des risques de non-conformité. Dans ce contexte, la maintenance industrielle joue un rôle stratégique en contribuant à la fiabilité et à la disponibilité des équipements tout en assurant la maîtrise des coûts d'exploitation.

Les approches traditionnelles de maintenance préventive, basées principalement sur des intervalles de temps fixes, ne permettent pas toujours de prendre en compte l'importance réelle des équipements dans le processus de production. Cette situation peut conduire à une répartition inefficace des ressources de maintenance et à une prise en charge insuffisante des équipements les plus critiques. Il devient alors nécessaire de mettre en œuvre une démarche permettant de hiérarchiser les équipements selon leur niveau de criticité afin d'orienter les actions de maintenance vers les actifs les plus stratégiques.

C'est dans cette optique que s'inscrit ce travail, qui vise à développer un *Indicateur de Priorisation de la Maintenance préventive des Equipements Agroalimentaires*, dénommé IPMEA. Ce modèle repose sur une approche multicritère intégrant des paramètres techniques, économiques, organisationnels et sanitaires afin d'évaluer la criticité des équipements et de faciliter la prise de décision en matière de maintenance préventive.

L'étude a été réalisée au sein de l'entreprise TRÈFLE (SPA Laiterie Sidi Saada, Relizane), dont les équipements et les données de maintenance ont servi de support à l'application et à la validation du modèle proposé. L'objectif est de démontrer l'intérêt d'une approche basée sur la criticité pour améliorer l'efficacité des interventions, réduire les arrêts non planifiés et optimiser les ressources de maintenance.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres organisés comme suit :

- Le premier présente le cadre théorique et les concepts fondamentaux de la maintenance industrielle.
- Le deuxième est consacré à la présentation de l'entreprise TRÈFLE ainsi qu'au contexte industriel de l'étude.
- Le troisième développe le modèle IPMEA, ses paramètres, sa formulation mathématique et les règles de classification des équipements.

- Le quatrième chapitre porte sur l'application et la validation du modèle au sein de l'entreprise étudiée, ainsi que sur l'élaboration d'un plan de maintenance préventive fondé sur les résultats obtenus.

- Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux apports du travail réalisé et présente les perspectives d'amélioration envisageables.

À travers cette démarche, ce mémoire est basé sur un outil d'aide à la décision capable de renforcer l'efficacité de la maintenance préventive dans l'industrie agroalimentaire et de contribuer à l'amélioration durable de la performance industrielle.

Chapitre 1 **: Cadre théorique et concepts fondamentaux**

Introduction

Dans ce chapitre nous allons introduire les concepts de base de la maintenance industrielle. Nous aborderons les différentes typologies de maintenance, les notions de fiabilité et de disponibilité, les méthodes d'analyse de criticité ainsi que les approches modernes employées pour l'amélioration de la performance des équipements industriels.

1.1 Maintenance industrielle

1.1.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective, également appelée « fonctionnement jusqu'à la rupture » ou « arrêt sur panne », consiste en l'ensemble des actions entreprises après la défaillance ou la dégradation d'un équipement. Selon la norme NF EN 13306, elle est définie comme une maintenance exécutée après la détection d'une panne, visant à remettre l'équipement dans un état lui permettant d'accomplir sa fonction requise, Bien que cette méthode nécessite peu d'engagement préalable, elle est souvent la plus coûteuse et la plus risquée dans le contexte industriel actuel. En théorie, elle devrait être évitée, même dans les industries disposant de nombreux équipements peu onéreux pouvant être doublés, car elle intervient uniquement après une panne du système et elle divisée en deux parties :

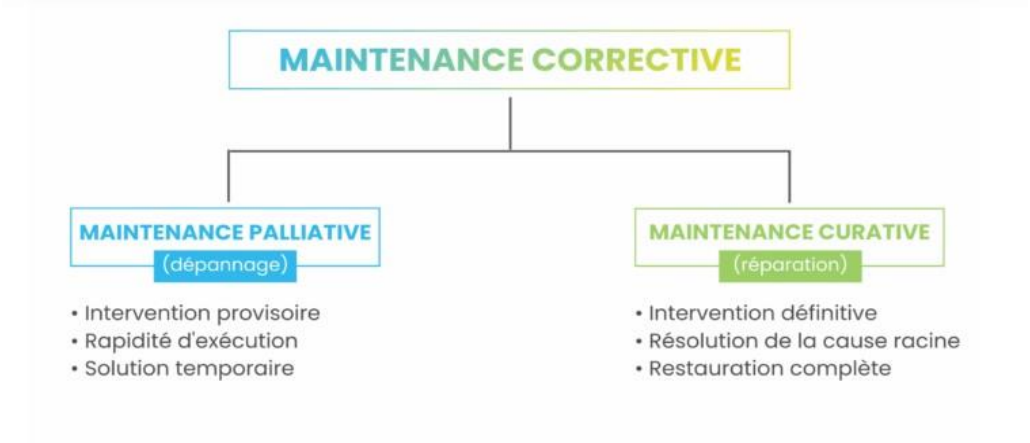

Figure 1-1: Maintenance Corrective

1.1.1.1 Maintenance Palliative

La maintenance corrective peut également inclure des opérations de dépannage provisoires, réalisées directement sur site (in situ), parfois sans interrompre le fonctionnement global de l'équipement ou du système concerné.

Cette forme de maintenance corrective, appelée maintenance palliative ou dépannage, consiste en des actions temporaires destinées à permettre à un bien d'accomplir, de manière provisoire, tout ou partie de sa fonction requise. Ces interventions provisoires doivent impérativement être suivies d'actions curatives visant à rétablir durablement l'état optimal de l'équipement.

1.1.1.2 Maintenance curative

Désigne une intervention définitive et durable visant à éliminer complètement la cause de la défaillance.

Elle consiste en des actions physiques effectuées pour rétablir la fonction requise d'un équipement en panne. Cette intervention est complète et repose sur un diagnostic approfondi préalable, permettant de résoudre le problème à sa source. La remise en état respecte les spécifications d'origine et assure la restauration de la fiabilité à long terme de l'équipement.

1.1.2 Maintenance préventive

La maintenance préventive (PM) est un ensemble d'actions de maintenance planifiée visant à la prévention des pannes et des défaillances spontanées. Elle repose sur des examens périodiques du système dans le but d'en prévenir les défaillances. Malgré une maintenance corrective, cette maintenance est généralement appliquée en dehors du temps de production. L'objectif de ce type de maintenance employée est de réduire le nombre de mesures d'entretien correctives appliquées par le biais de contrôles périodiques et de remplacement dès les pièces d'usure. Ahaner **[2]** a présenté un système de planification assistée par ordinateur pour la maintenance d'un ensemble de des centres d'usinage CNC de haute précision. Coro et al. **[1]** ont présenté l'inspection de programmation des turbines à gaz des structures soudées, sur la base de calculs de fiabilité et de résultats de révision. Il s'agit d'une maintenance exigeante, qui nécessite une supervision stricte et l'élaboration d'un plan doit être effectuée par du personnel qualifié. En outre, si elle n'est pas correctement appliquée, Si elle n'est pas correctement appliquée, toute dérive non détectée provoquera des arrêts imprévus engendrant un coût élevé en termes de productivité. Elle est divisée en 3 parties :

1.1.2.1 La maintenance préventive systématique

Est réalisée selon un calendrier prédéfini, basé sur une durée d'utilisation ou un nombre d'opérations spécifié, sans inspection préalable de l'état réel de l'équipement. Lors de chaque intervention, l'état des composants est évalué, soit par des mesures quantitatives, soit par une inspection visuelle. Les observations sont ensuite classifiées selon différents niveaux : aucune anomalie détectée, début de détérioration, détérioration avancée, ou situation critique.

Ces visites systématiques sont planifiées sur des intervalles généralement déterminés à partir de données statistiques. Ces intervalles sont souvent calculés pour garantir qu'à partir d'un état initial ou après une rénovation, le taux de pannes cumulées reste inférieur à 2,5 %, soit par précaution, soit en raison d'une connaissance imparfaite de l'usure et du comportement des machines. **[3]**

1.1.2.2 La maintenance préventive prévisionnelle

La maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien. (C'est dans cette maintenance prévisionnelle que l'on utilise les outils de CND : contrôles non destructifs), comme la thermographie infrarouge, l'analyse des lubrifiants, les mesures des vibrations ou des épaisseurs avec les ultra-sons).

1.1.2.3 La maintenance préventive conditionnelle

Selon la définition de l'AFNOR, est une maintenance subordonnée à un événement prédéterminé révélant l'état de dégradation de l'équipement. Cette méthode implique un suivi continu de la machine en fonctionnement, et l'intervention est décidée uniquement lorsque des preuves concrètes d'un défaut imminent ou d'une dégradation spécifique apparaissent.

Cette approche est particulièrement adaptée aux défauts qui évoluent progressivement ou par dérive. En analysant ces dérives lors des opérations de maintenance, il est possible d'identifier des seuils d'alerte, tant en mécanique qu'en électronique.

Lors de la conception d'une installation, des tolérances sont définies pour certains paramètres à surveiller. Le suivi de l'évolution de ces paramètres permet de planifier précisément la nature et le moment des interventions nécessaires. Parmi les paramètres couramment surveillés figurent :

- Le niveau de vibrations,
- La température,
- Des mesures électriques comme la tension ou l'intensité,
- Le pourcentage de particules présentes dans l'huile.

Le choix du paramètre à surveiller dépend de celui qui reflète le mieux la détérioration des composants ou la cause des perturbations de fonctionnement **[4].**

1.1.3 Maintenance prédictive

La maintenance prédictive est définie comme une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions. En maintenance prédictive, l'évolution des indicateurs de surveillance doit être suivie dans le temps afin d'en tirer des prévisions. La décision d'intervention et son degré d'urgence reposent sur l'identification préalable du, ou des fautes et sur l'estimation de leur gravité. Elle diffère de la maintenance conditionnelle par l'action d'extrapolation de la tendance analysée. Ceci lui permet de passer de l'état constaté à l'état prévisible.

Le terme de maintenance prédictive n'est pas normalisé. On le trouve souvent employé pour caractériser les prévisions de maintenance en fonction de la tendance d'évolution du dysfonctionnement détecté et de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste. Les conditions de mise en place d'une maintenance prédictive sur un équipement considéré peuvent être notées comme suit :

1. L'équipement présente une dégradation progressive et détectable.
2. Cette dégradation peut être saisie et mesurée à l'aide d'un paramètre.
3. L'appareillage qui permet cette mesure est fiable et les résultats peuvent être interprétés par un personnel qualifié.
4. La valeur initiale et la valeur limite du paramètre peuvent être fixées.
5. La limite fixée correspond bien à un seuil significatif pour la perte de fonction d'évolutions du paramètre.

La surveillance du paramètre représentatif pourra se faire, suivant l'importance de l'équipement, d'une manière périodique (observation, relevés, rondes, ...) ou d'une manière continue à l'aide de capteurs fixés sur l'équipement. Un programme de maintenance prédictive se compose de trois étapes :

1. L'acquisition des données.
2. Traitement des données

. 3. Prise de décision de la machine. **[5]**

1.2 Notions de fiabilité et sûreté de fonctionnement

1.2.1 Fiabilité et taux de défaillance

1. Définition de la fiabilité

La fiabilité est la caractéristique d'un système exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant une durée donnée**. [6].** La fiabilité est une des de la sûreté de fonctionnement. Elle peut être définie comme : la science des défaillances. C'est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ou à satisfaire les besoins des utilisateurs, dans des conditions données, pendant une durée donnée **[7], [8]**

Elle s'appuie sur les fondements mathématiques, la statistique et le calcul des probabilités.

Ces dernières sont nécessaires à la compréhension et à l'analyse des données de fiabilité.

La défaillance c'est-à-dire (la non fiabilité) augmente les coûts d'après-vente.

Construire plus fiable augmente les coûts de conception et de production, en pratique, le coût total d'un produit prend en compte ces deux tendances.

La fiabilité est une fonction décroissante du temps (Figure 1.3.1), de telle manière que

R (t1)>>R (t2) si t1<t2

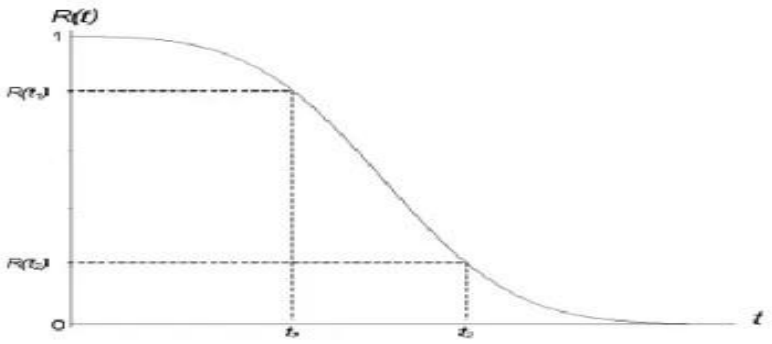

Figure 1-2 : la fiabilité décroissante avec le temps [9].

Elle résulte de l'observation et de l'analyse du comportement d'un certain nombre de dispositifs identiques, en conditions de fonctionnement réelles. En d'autres termes, il s'agit d'un traitement statistique d'un retour d'expérience. La moyenne issue de ce retour d'expérience n'a de sens qu'en considérant un nombre important de dispositifs, Là fiabilité opérationnelle est donc définie par :

$$R(t)=\frac{nombre\ mo\ en\ d\imath entités\ non\ defaillantes\ à\ l\imath instant\ t}{nombre\ total} \quad (1.1)$$

2. taux de défaillance

Le taux de défaillance, noté À(t), est un indicateur de fiabilité qui représente :

Soit un taux supposé constant de défaillance par unité d'usage exprimé sous la forme générale :

$$\frac{\boldsymbol{Nombre\ de\ defaillances}}{\boldsymbol{Durée\ d\imath usage}} \quad (1.2)$$

Le taux de défaillance s'exprime le plus souvent en pannes par heure **[10]**

1.2.2 MTBF et MTTR

1.2.2.1 MTBF

Si nous analysons ce cycle, nous remarquons qu'il est composé de la moyenne de temps de bon fonctionnement (MTBF). Cette moyenne est définie comme la durée moyenne entre deux défaillances (Mean time between failure) (figure 3.2). L'expression du MTBF est donnée par **[11].**

$$MTBF = MDT+MUT$$

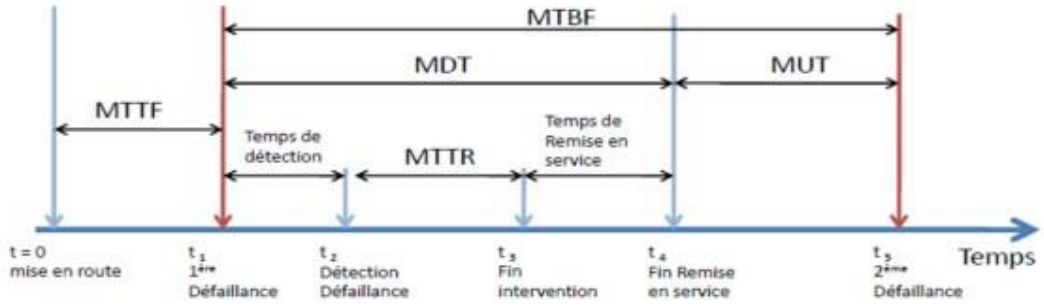

Figure 1-3: La présentation des différentes grandeurs en fonction du temps

- **MTBF** (mean time between failures) : moyenne des temps entre 2 défaillances consécutives

- **MDT** (mean down time) : appelé encore MTI, c'est le temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre

-**MUT** (mean up time) : temps moyen de disponibilité

- **MTTR** (mean time to repair) : temps moyen de réparation **[12]**

$$MTBF=\frac{\sum \text{temps de bon fonctionnement}}{n\text{ombre d'intervallesde tempe de bon fonctionnement}}$$

1.2.2.2 MTTR

(Mean Time to Repair) signifie "temps moyen de réparation d'une panne". Cet indicateur permet de caractériser la gravité d'une panne et la difficulté de résolution qui en découle. Pour le mesurer, il est nécessaire de répertorier les interventions de maintenance corrective sur un équipement et plus particulièrement le temps mis pour chaque intervention.

Il est calculé en additionnant les temps actifs de maintenance ainsi que les temps annexes de maintenance, le tout divisé par le nombre d'interventions

$$MTTR=\frac{\text{Temps d'arrêt total}}{\text{nombre de pannes}}$$

1.3 Analyse de criticité

1.3.1 Méthode AMDEC

L'AMDEC, analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité, est un outil d'analyse performant qui permet de recenser de manière exhaustive les risques de dérive d'un processus, d'un produit ou d'un moyen de production. Elle s'inscrit dans la logique de maîtrise des risques ; sa finalité est de mettre en place des plans d'actions préventives visant à éliminer ou réduire les risques liés à la sécurité de l'utilisateur, au non qualité, à la perte de productivité, à l'insatisfaction des clients… **[13].** En d'autres termes, c'est une méthode systématique, participative et préventive permettant d'analyser un système en analysant les causes et les effets des défaillances qui peuvent affecter les composants de ce système.

Buts et objectifs L'étude

AMDEC permet principalement d'optimiser les coûts, en effet elle constitue une méthode de diagnostic intelligente dans la mesure où elle permet de prévoir un certain nombre de faiblesses, de défauts, d'anomalies et de pannes au niveau de l'ensemble des éléments qui concourent à la fabrication d'un produit. Donc, le principal objectif lors d'une utilisation de la méthode AMDEC et de réduire les coûts s de maintenance. Et la méthode AMDEC a pour objectif aussi à :

• Identifier les causes et les effets de l'échec potentiel d'un procédé ou d'un moyen de production.

• Identifier les actions pouvant éliminer (ou du moins réduire) l'échec potentiel.

Caractéristique de la méthode AMDEC :

L'AMDEC est une méthode d'analyse inductive, exhaustive et rigoureuse qui permet une recherche systématique :

✓ Des modes de défaillance d'un moyen de production.

✓ Des causes de défaillance générant les modes de défaillance, ces causes peuvent se situer.

✓ Au niveau des composants du moyen de production ou être dues à des sollicitations extérieurs

. ✓ Des conséquences des défaillances sur le moyen de production, sur son environnement, sur le produit ou sur l'homme.

✓ Des moyens de détection pour la prévention et/ou la correction des défaillances **[14].**

Les avantages et les limites

L'AMDEC s'avère très efficace lorsqu'elle est mise en œuvre pour l'analyse de défaillances simples d'éléments conduisant à la défaillance globale du système. De par son caractère systématique et sa maille d'étude généralement fine, elle constitue un outil précieux pour l'identification de défaillances potentielles et les moyens d'en limiter les effets ou d'en prévenir l'occurrence. Comme elle consiste à examiner chaque mode de défaillance, ses causes et ses effets pour les différents états de fonctionnement du système, l'AMDEC permet d'identifier les modes communs de défaillances pouvant affecter le système étudié. Les modes communs de défaillances correspondent à des événements qui de par leur nature ou la dépendance de certains composants, provoquent simultanément des états de panne sur plusieurs composants du système. Les pertes d'utilités ou des agressions externes majeures constituent par exemple, en règle générale, des modes communs de défaillance. Dans le cas de systèmes particulièrement complexes comptant un grand nombre de composants, l'AMDEC peut être très difficile à mener et particulièrement fastidieuse compte tenu du volume important d'informations à traiter. Cette difficulté est décuplée lorsque le système considéré comporte de nombreux états de fonctionnement. Par ailleurs, l'AMDEC considère des défaillances simples et peut être utilement complétée, selon les besoins de l'analyse, par des méthodes dédiées à l'étude de défaillances multiples comme l'analyse par arbre des défaillances**. [15]**

1.3.2 Méthodes de classification (ABC)

La méthode ABC est un moyen objectif d'analyse. Elle permet de classer les éléments qui représentent la fraction la plus importante du caractère étudié, en indiquant les pourcentages pour un critère déterminé. La représentation de la méthode est la courbe ABC qui permet de visualiser de façon simple les résultats **[16]**

Le tracé de cette courbe nécessite l'application des règles suivantes

1 :. Détermination du cadre de l'étude et ses limites :

✓ Définir la nature des éléments à classer:défaillances, pièces de rechange, bon travail.

✓ Choisir le critère de classement: coût, temps nombre d'heures d'utilisation du matériel.

✓ Recherche la période représentative: les valeurs critère choisi doivent correspondre à une période représentative pour le caractère étudié. L'année ou le semestre convient.

Présentation graphique

Elle consiste à classer les pannes par ordre décroissant de coûts, chaque panne se rapportant à une machine ou rubrique. Puis à établir un graphe faisant correspondre le pourcentage de coûts, chaque panne se rapportant à une machine ou rubrique

Zone "A" : Dans la majorité des cas, on constate qu'environ 20% des pannes représente 80% des coûts, ceci constitue la zone A, zone des priorités

Zone "B" : Dans cette tranche, les 30% des pannes suivantes ne coût 15% supplémentaire.

Zone "C" : Dans cette zone les 50% des pannes restantes ne représentent qu'a 5% de coûts **[17].**

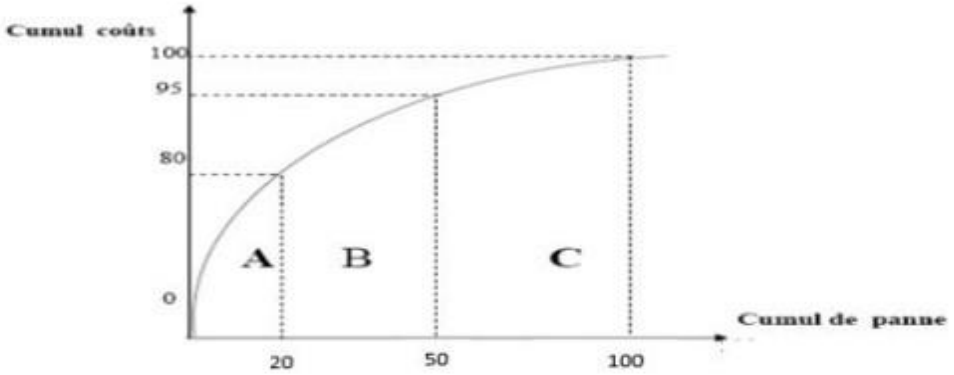

Figure 1-4:représentation des trois zones de la courbe ABC.

Objectif de de la méthode ABC

La méthode de classement ABC vise principalement à optimiser la gestion des ressources d'une organisation en classant les articles, produits ou composants selon leur importance économique et stratégique. Basée sur le principe de Pareto, elle identifie un petit nombre d'éléments

- (classe A) qui représentent la majeure partie de la valeur totale, nécessitant un suivi strict et prioritaire. Les éléments de classe B occupent une position intermédiaire avec un suivi modéré, tandis que les éléments de classe C, bien que nombreux, ont une faible valeur financière et peuvent être gérés plus simplement. Cette méthode améliore l'efficacité opérationnelle, réduit les coûts de stockage, facilite les décisions d'approvisionnement et renforce la performance globale de l'entreprise.

1.4 Approches modernes de maintenance

1.4.1 Maintenance basée sur la fiabilité RCM / MBF

La maintenance basée sur la fiabilité intègre la maintenance préventive (PM), les tests et Inspections prédictifs (PT&I), la réparation (également appelée maintenance corrective) et là Maintenance proactive pour augmenter la probabilité qu'une machine ou un composant fonctionne de la manière requise tout au long de son cycle de vie avec un minimum de maintenance et de temps d'arrêt. Ces principales stratégies de maintenance, plutôt que d'être appliquées Indépendamment, sont intégrées de manière optimale pour tirer parti de leurs forces respectives et maximiser la fiabilité des installations et des équipements tout en minimisant les coûts du cycle de vie. L'objectif de cette approche est de réduire au minimum le coût du cycle de vie (CCV) d'une installation (d'un équipement) tout en continuant à permettre à l'installation de fonctionner comme prévu avec la fiabilité et la disponibilité requise **[18]**

Objectif d'une approche RCM

L'idée d'une stratégie RCM est d'identifier la méthode de maintenance la plus appropriée et avantageuse pour réduire le risque d'incidents et de pannes, tout en créant un milieu de travail sécurisé. Cela permet aussi de sauvegarder et maintenir les investissements en capital ainsi que leurs performances. Cet objectif est réalisé en identifiant les modes de défaillance et leurs répercussions pour chaque système. Cela assure la pérennité des systèmes et des appareils de la

façon la plus économique possible. Les buts précis de la RCM, comme le détaillent Nowlan et Heap, sont les suivants :

- ✓ Assurer la réalisation des niveaux de sécurité et de fiabilité inhérents de l'équipement. Restaurer l'équipement à ces niveaux inhérents lorsque la détérioration se produit.
- ✓ Obtenir les informations nécessaires pour améliorer la conception de ces éléments lorsque leur fiabilité inhérente s'avère insuffisante.
- ✓ Pour atteindre ces objectifs à un coût total minimum, y compris les coûts de maintenance, les coûts de soutien et les conséquences économiques des défaillances opérationnelles. **[19]**

Principes de la MBF

1. Principe d'auto limitation : ou de sélection systématique. Il s'applique aux criticités des équipements et à des niveaux successifs *: équipements critiques ➔sous-ensembles fragiles ➔ leurs défaillances ➔ les causes ➔ les tâches de maintenance.*

2. Principe de subordination : les tâches de maintenance dépendent obligatoirement de la Connaissance fiabiliste des défaillances et de leurs causes ; ce qui implique une Connaissance fonctionnelle et dysfonctionnelle des équipements.

3. Principe de participation : la MBF repose sur des groupes de travail impliquant tous les acteurs liés au processus (production, maintenance, qualité). **[20]**

1.4.2 La TPM

1.4.2.1 Historique et origine de la TPM

L'approche planifiée de la maintenance préventive a vu le jour au Japon dans les années 1950. Elle a été introduite par Seiichi Nakajima, membre éminent de l'Institut Japonais de Maintenance des Installations (JIPM). Ce dernier est reconnu comme le pionnier du développement progressif de cette démarche, qui s'est articulée en trois grandes étapes :

1. Maintenance préventive (basée sur le temps)
2. Maintenance productive (basée sur la condition ou la prédiction)
3. Maintenance Productive Totale (TPM)

La Total Productive Maintenance (TPM) a été formalisée dans les années 1970. Ce concept japonais vise à maximiser l'efficacité globale des équipements (Over all Equipment Effectiveness – OEE) tout en réduisant les arrêts de production non planifiés.

Il s'agit d'une méthode proactive et participative qui repose sur l'implication de l'ensemble du personnel, de la direction aux opérateurs de terrain.

La TPM se distingue par sa capacité à traiter aussi bien les défaillances passées que Les défaillances potentielles, en s'appuyant sur une observation rigoureuse des équipements sur une période prolongée. **[21]**

1.4.2.2 Définitions

La Total Productive Maintenance est une méthode systématique visant à maintenir les installations en bon état de fonctionnement, tout en améliorant leur efficacité et en réduisant les pertes. Elle repose sur l'implication de tous les acteurs de l'entreprise dans la gestion quotidienne de la maintenance.

Le terme TPM se décompose ainsi :

• T – Total : Implication de tout le personnel, sans exception, dans les actions de maintenance et d'amélioration.

• P – Productive : Optimisation de l'utilisation des équipements pour garantir une production fluide et sans interruption.

• M – Maintenance : Maintien et amélioration continue des installations en bon état de fonctionnement**. [21]**

1.4.2.3 Objectifs de la TPM

L'objectif principal de la TPM est d'améliorer la fiabilité et la productivité des machines :

- ✓ L'amélioration de l'efficacité du système de production.
- ✓ La valorisation et l'intégration des ressources humaines.
- ✓ La création du sens de responsabilité vis-à-vis des équipements.
- ✓ Réduire le nombre d'erreurs.
- ✓ L'optimisation du temps de production.
- ✓ Réduire les pertes de production et déchets

1.4.2.4 Les indicateurs de performance

Le TRS « Taux de Rendement Synthétique » est issu de la « TPM » Total Productive Maintenance, il mesure le rendement d'une machine.

La norme NF E 60-182 définit le TRS comme suit :

TRS = Temps utile/ Temps requis

Tel que :

- ➢ □ Temps Requis = Temps d'Ouverture - Arrêts planifiés.

- □ Temps Utile = Temps Net – Rebuts.
- □ Temps d'Ouverture = Temps Total de production - Temps de Fermeture des
- Ateliers.
- □ Temps Net = Temps de Fonctionnement - Ecart de cadence.
- □ Temps de Fonctionnement = Temps Requis - Arrêt non planifiés.

Il peut aussi être calculé par :

TRS = Taux de disponibilité × Taux de performance × Taux de qualité

1.4.3 Les méthodes multicritères

1.4.3.1 Méthode AHP

Le processus de hiérarchie analytique est l'une des méthodes MCDM les plus utilisées et aide à comprendre le problème et à choisir une décision qui correspond à l'objectif des spécialistes. Sa force réside dans sa facilité de compréhension en général. Le programme AHP désassemble d'abord le problème de décision d'origine dans une structure hiérarchique et contient l'objectif de décision, les alternatives, les critères et la comparaison pour obtenir les priorités de tous les éléments. Le programme AHP se déroule en quatre étapes pour obtenir l'installation de toutes les alternatives [22].

Étape 1 : Décomposer le problème en une hiérarchie d'éléments interreliés. Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des actions.

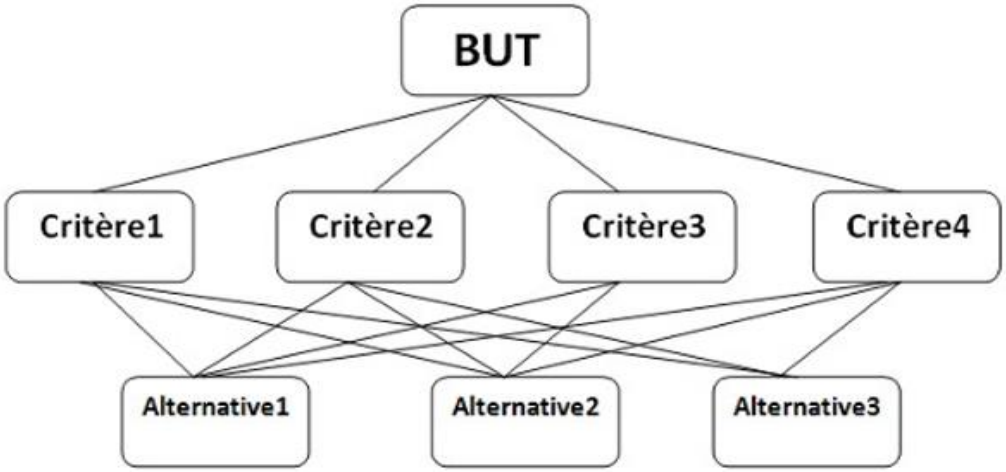

Figure 1-5: Structure de la hiérarchie AHP

Étape 2 : Procéder à des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Échelle de comparaisons binaires), tout en respectant le principe de réciprocité **: [23]**

Tableau 1-1: Échelle de Saaty de la méthode AHP [24]

Degré D'importance	Définition
1	Importance égale des 2 éléments
3	Faible importance dans éléments par rapport à un autre
5	Importance forte au déterminant d'un élément par rapport à un autre
7	Importance attester d'un élément par rapport à un autre
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre
2, 4, 6,8	Valeur intermédiaire entre 2 appréciations voisines
Réciprocité	Si l'élément i se voir attribuer l'un des chiffres pour précédent lorsqu'elle est comparée à l'élément j ce dernier aura donc la valeur inverse lorsqu'on le compare à i

Étape 3 : Déterminer l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

Étape 4 : Vérifier la cohérence des jugements. On calcule d'abord, l'indice de cohérence IC

$$IC = \frac{Ymax - n}{\mathrm{n} - 1}$$

Où : λmax est la valeur propre maximale correspondant à la matrice des comparaisons par paires et n est le nombre d'éléments comparés. On calcule le ratio de cohérence (RC) défini par :

$$\mathrm{RC}=100\frac{IC}{ACI}$$

Où ACI est l'indice de cohérence moyen obtenu en générant aléatoirement des matrices de jugement de même taille.

Tableau 1-2: Indice de cohérence moyen

Dimension de la matrice	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Aléatoire ACI	**0.00**	**0.00**	**0.58**	**0.90**	**1.12**	**1.24**	**1.32**	**1.41**	**1.45**	**1.49**

Étape 4 : Synthétiser les priorités finales

La dernière étape consiste à résumer un ensemble de priorités globales afin de prendre la décision alternative finale. Problèmes de décision complexes. Choisissez la meilleure décision parmi un certain nombre d'alternatives Il a été évalué selon plusieurs critères. Dans ce processus, les messages directs utilisent une simple comparaison par paires Dispositions pour le développement de priorités générales pour l'arrangement des alternatives

En fin de compte, nous voyons que le programme AHP a reçu le plus d'attention parmi les universitaires et est fréquemment utilisé dans le monde entier en raison de sa simplicité, de sa qualité et de sa facilité d'utilisation [**25].**

1.4.3.2 Les principales méthodes multicritères

La littérature en aide multicritère à la décision renferme de nombreuses méthodes. Roy [**26**], a regroupé ces dernières dans trois catégories principales représentant chacune d'entre elles des approches différentes.

1.5 Les coûts de maintenance

Les coûts de maintenance représentent l'ensemble des dépenses engagées pour maintenir en état de fonctionnement un système complexe. Bien souvent ils sont associés à des exigences de fonctionnement en termes de sécurité, de fiabilité ou encore de disponibilité. L'analyse des coûts permet au responsable de la politique de maintenance d'effectuer ses choix principaux :

- Etablissement d'un budget prévisionnel annuel.

- Suivi des dépenses et respect du budget.
- Niveau de maintenance préventive à mettre en œuvre.
- Vérification de l'efficacité des actions de maintenance.
- Décision du recours ou non à la sous-traitance et à la main d'œuvre externe.
- Renouvellement du matériel

1.5.1 Les coûts directs de maintenance

Notations : Les dépenses directes de maintenance sont notées DM Les coûts directs de maintenance sont notés CM ou parfois p dans le cas d'une intervention.

-Coûts de main-d'œuvre : C'est le produit du « temps passé » x taux horaire.

-**Temps passés** : ils sont normalement saisis sur les BT honnêtement complétés, ou fournis par les chefs d'équipes. Taux horaires : ils sont fournis par le service « comptable », Relatifs à une qualification professionnelle (ex : OP3), ils intègrent, outre le salaire horaire, l'ensemble des charges sociales. Ces taux varient de 23 € à 66 €/h pour les techniciens d'intervention, suivant la politique de l'entreprise

. - Il ne faut pas confondre « coût horaire » et « salaire horaire ».

-Coûts de possession des stocks, des outillages des machines :

Ces coûts sont caractérisés par :

- Un taux d'amortissement.
- Une évaluation des pertes et dépréciations dues au stockage.
- Frais de magasinage

-Consommation de matières, de fournitures, de produits :

Coût d'achat + frais de transport + coût de passation de commande

Il faut faire attention à l'actualisation des prix de certains consommables, en stock depuis plusieurs années !

La marge sur coût direct permet de mesurer la contribution d'un produit à la couverture des charges directes. • Selon cette méthode un produit est donc rentable une fois sa marge sur coût direct est positive.

- Les coûts directs sont calculés en additionnant toutes les dépenses réelles et mesurables engagées pour l'opération de maintenance. La formule : $CD = Cmo + Cpr + Cst + Cf$

Cmo : **(Main-d'œuvre) :** (Nombre d'heures passées) (Taux horaire chargé du technicien).
Cpr : **(Pièces de rechange) :**(Prix d'achat des pièces utilisées + consommables (huiles, joints).
Cst : **(Sous-traitance) :** Montant des factures des prestataires externes.
Cf : coûts fixe

1.5.2 Les coûts indirects de maintenance

Notations : Les coûts indirects de maintenance sont des coûts de perte de production (non production) et sont notés CP ou parfois P dans le cas d'une intervention. On distinguera lorsque l'on définit le TA (temps d'arrêt production), les TAM imputables à la maintenance, des TAF imputables à la fabrication.

1.5.3 Coûts de perte de production

Il contient

 Coûts de perte des produits non fabriqués, des matières premières en cours de transformation, perte de qualité, perte des produits déclassés. Ces coûts sont à adapter au contexte industriel, et sont nommés « coûts de déclassements ».

 Coûts de main-d'œuvre (de fabrication) inoccupé.

 Coûts d'amortissement du matériel arrêté.

 Frais induits : délais non tenus (pénalités de retard, perte de clients, image de marque ternie...) et perte de qualité de fabrication.

 Frais de remise en route du processus de production.

1.5.4 Les coûts de défaillance

Notation : Ils sont notés CD et ils représentent la somme des coûts directs et indirects attachés à une défaillance ou attachés à l'activité d'un service entretien. $CD = DM + CP$
Pour une intervention corrective, on note le coût d'une défaillance $CD = p + P$
Une confusion se trouve souvent dans les articles entre le coût de défaillance et le coût de perte de production

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les bases théoriques de la maintenance industrielle et les principaux concepts liés à la fiabilité, à la criticité et aux méthodes de maintenance. Les diverses approches et outils étudiés forment une base indispensable pour saisir l'importance de la maintenance préventive et la nécessité de donner la priorité aux équipements critiques, en vue d'optimiser la performance industrielle et la continuité de la production.

Chapitre 2 : Présentation générale de l'entreprise

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'entreprise TRÈFLE et son environnement industriel. Nous verrons l'organisation de l'entreprise, les différentes lignes de production, le service maintenance et les principales contraintes techniques liées au processus de fabrication dans l'industrie agroalimentaire.

2.1 Présentation générale de l'entreprise :

2.1.1 Historique et évolution :

La laiterie est située à Sidi Saada, dans la municipalité de Yellel Wilaya de Relizane qui est un projet initié par une entreprise OROLAIT dans le cadre de ses plans de développement pour créer la concurrence entre les institutions nationales et leurs homologues étrangers. Parmi ces institutions ALFA LAVAL. La superficie totale est de 98 000 m2 et la zone couverte est de 23 000 m2 ainsi que la zone de logement du personnel est de 1000 m2. Ci-dessous résume les principales dates de création et de mise en service du complexe laitier de SIDI SAADA. 1987 : Lancement du projet Maitre de l'ouvrage : l'office régional du lait (OROLAIT) Constructeur : ALFA LAVAL France. 1993 : Mise en exploitation de l'usine. 1997 : Passage sous la tutelle du GIPLAT après dissolution des offices régionaux (octobre). 2001 : Changement de statuts en filiale de groupe Giplait (avril). 2007 : Cession de la totalité des actions de l'EPE laiterie fromagerie SIDI SAADA à la SARL PRODUITS LAITIERS TREFLE.

2.1.2 Organisation structurelle

-Direction Générale

- **Directeur Général (DG)** : Responsable global de l'usine, il supervise toutes les activités, prend les décisions stratégiques et représente l'usine auprès des partenaires et des autorités.
- **Assistant DG / Secrétariat Général** : Assure la coordination des projets, le suivi administratif et la préparation des rapports destinés au DG.
- **Conseil de Direction** : Organise des réunions périodiques pour la planification stratégique et le suivi des performances de l'usine.

-Direction Technique et Production

- **Responsable Technique et Production** : Supervise l'ensemble du processus industriel.
- **Service Réception et Contrôle du Lait**

-Vérification de la qualité du lait cru (pH, bactériologie, matières grasses).

-Gestion des stocks de lait et suivi des fournisseurs.

- **Service Transformation et Production**

-Gestion des lignes de production : lait pasteurisé, yaourts, fromages, beurre.

-Optimisation des procédés et suivi de la performance.

- **Service Maintenance Industrielle**

-Entretien préventif et curatif des machines.

-Gestion des pièces de rechange et équipements.

- **Service Sécurité Industrielle**

-Formation du personnel et prévention des risques liés aux installations

-Direction Qualité et Hygiène

- **Responsable Qualité** : Assure le contrôle de la conformité des produits aux normes ISO, HACCP et aux règles d'hygiène alimentaire.
- **Laboratoire** : Réalise les analyses chimiques et microbiologiques du lait et des produits finis.
- **Contrôle en ligne** : Effectue une vérification continue de la qualité tout au long du processus de production.

-Direction Commerciale et Marketing

- **Responsable Commercial** : En charge du développement des ventes et de la gestion des relations clients.
- **Service Marketing** :S'occupe de la promotion des produits, de la publicité et des études de marché.
- **Service Ventes et Distribution** : Assure le suivi des commandes ainsi que les relations avec les distributeurs et les points de vente.
- **Département Export** : Coordonne les exportations vers d'autres régions ou pays.

-Direction Logistique et Approvisionnement

- **Responsable Logistique** : Organise le stockage, les flux internes et la distribution des produits.

- **Gestion des Matières Premières** : Supervise l'approvisionnement en lait, emballages et additifs.
- **Stockage & Entrepôt** : Gère l'organisation et l'inventaire des produits finis et des matières premières.
- **Transport et Distribution** : Administre la flotte de camions et assure la livraison des produits finis.
- **Planification Production & Approvisionnement** : Coordonne les activités de production et d'approvisionnement pour éviter les ruptures de stock.

-Direction Administrative et Financière :

- **Responsable Administratif et Financier** : Supervise la gestion globale des ressources humaines, des finances et des affaires administratives.
- **Ressources Humaines** : Gère le recrutement, la formation, le suivi des carrières et l'administration du personnel.
- **Comptabilité et Finances** : Assure la gestion du budget, l'établissement des bilans annuels et l'analyse des coûts.
- **Service Juridique** : Veille au suivi des contrats et à la conformité réglementaire.
- **Service Informatique** : Gère le système informatique et les logiciels utilisés dans l'industrie.

2.1.3 Gamme de produits :

La laiterie TRÈFLE (Sidi Saada) propose une gamme diversifiée de produits laitiers articulée autour de **quatre grandes familles**, chacune associée à une ligne de production spécifique et soumise à des exigences techniques et sanitaires particulières.

a) Lait pasteurisé

Le lait pasteurisé constitue le produit de base de la laiterie. Il est issu du traitement thermique du lait cru réceptionné quotidiennement, puis **conditionné en sachets plastiques**. Ce format impose une exigence absolue de **continuité de service** des équipements de pasteurisation et de conditionnement, ainsi qu'une gestion rigoureuse de la **chaîne du froid** depuis la production jusqu'au point de vente. La **DLC (Date Limite de Consommation) courte** de ce produit — généralement de 48 à 72 heures — rend toute panne de la ligne de conditionnement particulièrement critique pour la rentabilité de l'entreprise.

b) Fromages à pâte molle — Camembert

Le camembert rond, commercialisé en formats **250 g et 350 g**, est fabriqué selon un procédé long et séquentiel (maturation, coagulation, égouttage, salage, affinage) mobilisant plusieurs lignes automatisées. Son conditionnement en **boîtes individuelles** exige une hygiène renforcée à chaque étape, notamment en salle d'affinage où la température et l'hygrométrie sont régulées en continu par la CTA et le système Cyclair. La durée d'affinage implique une **immobilisation prolongée des équipements**, ce qui renforce l'importance d'une disponibilité maximale des machines tout au long du cycle.

c) Fromage fondu — LAIBNI

Le fromage fondu LAIBNI est disponible en trois grammages : **15 g, 50 g et 200 g**, conditionnés respectivement en portions individuelles et en boîtes. Ce produit à plus longue conservation nécessite néanmoins une **hygiène stricte** lors de la fusion thermique et du moulage, ainsi qu'une maîtrise précise des paramètres de température de process. La diversité des formats de conditionnement implique des changements de réglages fréquents sur les lignes, constituant une source potentielle d'arrêts de production.

d) Yaourt

Le yaourt Sidi Saada, conditionné en pots de 1 kg, est fabriqué par fermentation lactique contrôlée. Ce produit est particulièrement sensible aux variations de température d'incubation et de refroidissement. Il est soumis à une DLC courte et impose une gestion stricte de la chaîne du froid jusqu'à la livraison. Toute défaillance des équipements de fermentation ou de réfrigération peut entraîner une perte totale du lot en production.

Synthèse

La gamme se compose principalement de produits laitiers frais et semi conservés (lait pasteurisé, camembert, fromage fondu, yaourt). Ces produits sont conditionnés en sachets plastiques, boîtes individuelles et pots, ce qui impose des exigences strictes en matière de continuité de service des équipements de remplissage et de conditionnement, de maîtrise thermique à chaque étape du procédé, et d'hygiène renforcée conforme aux normes de l'industrie agro-alimentaire. Ces contraintes justifient pleinement la mise en place d'un plan de maintenance préventive structuré.

2.2 Description du processus de production

2.2.1 Description des lignes de production

La production est répartie en quatre ateliers principaux, chacun disposant d'un degré d'automatisation spécifique et d'équipements critiques dédiés.

A. Ligne Fromage Fondu (Atelier LAIBNI)

C'est la ligne la plus complexe techniquement en raison de l'intégration du process (cuisson) et du conditionnement haute cadence.

- **Préparateur / Mélangeur :** Cuve inox avec agitation pour l'incorporation des matières premier
- **Cuiseur sous vide (Type Stephan) :** Équipé de couteaux rotatifs et d'une double enveloppe pour le chauffage à la vapeur.
- **Machine ERCA (FFS - Form Fill Seal)**
  - *Unité de chauffage :* Plaques chauffantes pour ramollir le film plastique.
  - *Poste de formage :* Pistons pneumatiques et vide pour créer les alvéoles.
  - *Poste de dosage :* Becs doseurs volumétriques pour le fromage chaud.
  - *Poste de scellage :* Têtes thermiques pour souder l'opercule aluminium.
  - *Poste de découpe :* Emporte-pièce mécanique pour séparer les portions.

Figure 2-1: machine ERCA

B. Ligne Yaourt en bouteille (1 kg)

Cette ligne est une chaîne intégrée allant de la fabrication du contenant au conditionnement final.

- **Pasteurisateur à plaques :** Échangeur thermique pour le traitement final du mix.
- **Cuves de fermentation :** Cuves isolées avec contrôle de température (vannes modulantes).

Figure 2-2:Cuves de fermentation

- **Pompe de transfert (Type volumétrique ou centrifuge) :** Pour acheminer le yaourt brassé vers la conditionneuse.
- **Souffleuse KHS :** Machine critique qui transforme les préformes en plastique en bouteilles de 1 kg par injection d'air haute pression après chauffage infrarouge.

Figure 2-3:souffleuse KHS

- **Remplisseuse GEA (Doseuse) :** Équipement de précision pour le dosage volumétrique du yaourt. Elle garantit une hygiène maximale (conception aseptique ou ultra-propre) pour éviter toute contamination avant le bouchonnage.

- **Étiqueteuse P.E. LABELLERS :** Machine rotative haute performance assurant la pose précise des étiquettes (adhésives ou à colle froide) sur le corps des bouteilles.

Figure 2-4: Étiqueteuse P.E

- **Fardeleuse DIMAC :** Assure le regroupement des bouteilles (généralement par packs de 6 ou 12) et leur enveloppement sous film thermo rétractable.
- **Palettiseur :** Système automatisé de mise en couches des fardeaux sur des palettes bois ou plastique.
- **Banderoleuse (Filmeuse) :** Machine de fin de ligne qui sécurise la palette par l'application d'un film étirable pour le transport.

C. Ligne Lait en sachet

Ligne à haute cadence basée sur la soudure thermique de films souples.

- **Homogénéisateur :** Pompe haute pression pour stabiliser les matières grasses.

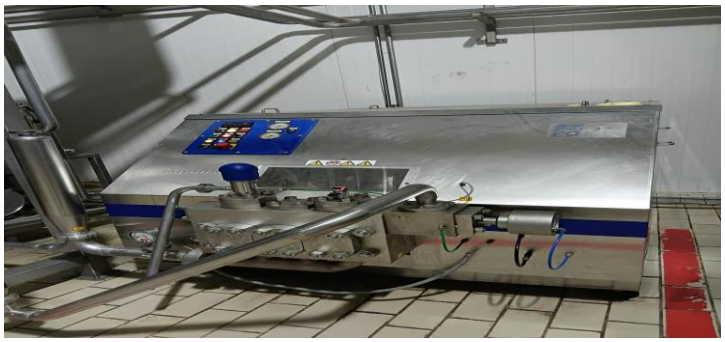

Figure 2-5: homogénéisateur

- **Ensacheuse PREPAC :** C'est la machine emblématique de cet atelier. Elle assure la formation du sachet à partir d'une bobine de film polyéthylène, le dosage précis du lait pasteurisé, et la soudure thermique (horizontale et verticale) en milieu stérile ou semi-stérile.

- **Dateur Domino :** Marquage à jet d'encre pour la DLC.
- **Convoyeur de sortie :** Bande transporteuse vers la mise en casier manuelle ou automatique.

D. Ligne Camembert (Pâte Molle)

Ici, la mécanisation est plus douce pour préserver la structure du caillé.

- **Bassines de caillage :** Récipients où le lait coagule après ajout de présure.
- **Tranche-caillé :** Dispositif de découpe (fils inox) pour favoriser l'égouttage.
- **Répartiteur de moules :** Système de distribution du caillé dans les moules multi-alvéoles.
- **Retourneur de moules :** Équipement mécanique pour assurer l'égouttage régulier sur les deux faces.
- **Hâloir (CTA) :** Centrale de Traitement d'Air gérant l'humidité et la température pour le développement de la fleur.

2.2.2 Contraintes techniques et sanitaires

La production à la laiterie **TRÈFLE** est régie par des exigences strictes qui conditionnent la sécurité alimentaire et la continuité du process. Ces contraintes se déclinent en quatre axes majeurs **A. Maîtrise thermique et hygrométrique**

Le contrôle des ambiances est vital pour les processus biologiques (fermentation et affinage) :

- **Atelier Camembert :** L'affinage en hâloirs repose sur la **Centrale de Traitement d'Air (CTA)** et le système **Cyclair**. Ils régulent précisément la température et l'hygrométrie pour le développement du *Geotrichum candidum*. Toute dérive risque de compromettre l'aspect et la conformité du lot.
- **Atelier Yaourt :** La fermentation nécessite un maintien rigoureux entre **42°C et 45°C**, suivi d'un refroidissement rapide à **4°C** pour stopper l'acidification et fixer la texture.
- **Chaîne du Froid :** Pour le lait en sachet et le yaourt, le refroidissement immédiat à **4°C** est la seule garantie de conservation (DLC).

B. Disponibilité des utilités industrielles

Le fonctionnement des lignes dépend de trois flux énergétiques critiques :

1. **Traitement des eaux :** L'eau de forage subit une filtration sur sable puis un passage par **osmose inverse** (pureté > 98%) pour garantir une eau de process exempte de minéraux et de micro-organismes.

2. **Production de vapeur (Chaufferie) :** Assurée par deux chaudières **Babcock-Wanson** (14,5 t/h à 6 bars / 170°C). Le traitement de l'eau (adoucisseur et dégazeur thermique) est essentiel pour prévenir la corrosion et l'entartrage des circuits.
3. **Production d'eau glacée (Froid) :** Cruciale pour le refroidissement du process. Elle est produite par un compresseur à vis **Trane** (base) et un compresseur à piston **SABROE** (appoint/secours), offrant une redondance sécurisante.

C. Hygiène et Système CIP (Clean In Place)

La sécurité sanitaire repose sur le nettoyage automatisé des circuits sans démontage. Le cycle **CIP** suit un protocole rigoureux :

- **Prérinçage** à l'eau claire.
- **Lavage alcalin (Soude)** à chaud pour éliminer graisses et protéines.
- **Lavage acide** pour neutraliser le tartre minéral.
- **Rinçage final** et désinfection pour garantir la stérilité avant la reprise de la production.

c. Contrôle Qualité et Conformité

Trois laboratoires assurent une surveillance constante à chaque étape :

- **Amont :** Analyse du lait cru (acidité, densité, recherche d'antibiotiques).
- **Process :** Suivi en temps réel des températures de pasteurisation et des cinétiques de pH.
- **Aval :** Validation microbiologique et sensorielle des produits finis avant expédition.

2.3 Organisation du service maintenance :

2.3.1 Structure organisationnelle :

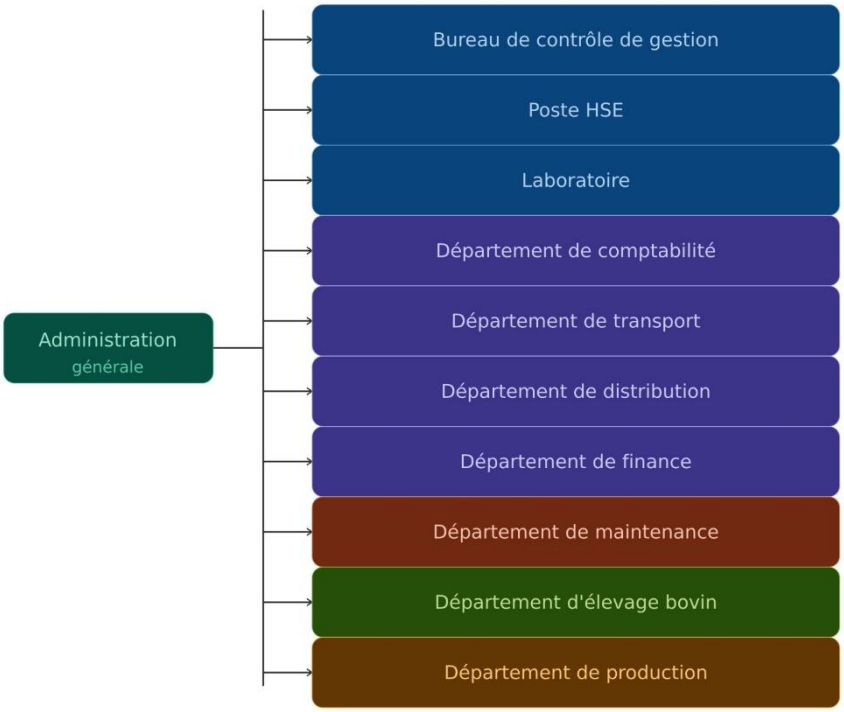

Figure 2-6:Structure organisationnelle de l'entreprise tréfle

2.3.2 Politique de maintenance actuelle

La stratégie de maintenance de l'usine Trèfle a pour but de garantir la pérennité de la production, la protection des machines et l'excellence des produits terminés. Elle adopte une stratégie globale qui fusionne la maintenance préventive, corrective et améliorative dans le but d'améliorer l'efficacité des installations et de minimiser les dangers de rupture

Objectifs de la maintenance

La politique de maintenance a pour objectifs de :

- Assurer une disponibilité maximale des équipements de production.
- Réduire les temps d'arrêt et les pannes imprévues.
- Garantir la sécurité du personnel ainsi que des installations.
- Maintenir un niveau élevé de qualité des produits finis.
- Optimiser les coûts de maintenance tout en prolongeant la durée de vie des machines.

2.3.3 Types de maintenance appliqués

2.1 Maintenance Préventive

- Réalisation d'interventions planifiées à fréquence régulière (quotidiennes, hebdomadaires, mensuelles).
- Contrôle systématique des équipements tels que les pompes, échangeurs et lignes de conditionnement.
- Lubrification, nettoyage et remplacement préventif des pièces usées.
- Organisation et planification des interventions via un programme de maintenance préétabli.

2.2 Maintenance Corrective

- Intervention rapide en cas de panne ou de dysfonctionnement.
- Diagnostic précis des causes de défaillance.
- Réparation ou remplacement des équipements défectueux.

2.3 Maintenance Améliorative

- Optimisation des performances des machines.
- Modernisation des équipements pour accroître la productivité.
- Réduction des risques de panne à long terme grâce à des améliorations ciblées.

2.3.4 Organisation du service maintenance

Le service maintenance est structuré de la manière suivante :

- Responsable maintenance : en charge de la planification et de la supervision des activités.
- Techniciens de maintenance : responsables des interventions mécaniques, électriques et en automatisme.
- Magasin de pièces de rechange : gestion des stocks, avec un focus particulier sur les pièces critiques.

4. Moyens et outils utilisés

- Plans de maintenance préventive.
- Fiches techniques des équipements.
- Historique des pannes et des interventions.
- Outils de diagnostic, tels que multimètre, analyse vibratoire, etc.

5. Suivi et amélioration

- Analyse des indicateurs clés : taux de panne, temps d'arrêt, disponibilité des équipements.

- Tenue de réunions périodiques pour évaluer les performances du service maintenance.
- Mise en place d'actions correctives et préventives adaptées pour optimiser la maintenance.

Conclusion

La politique de maintenance mise en œuvre par l'usine Trèfle garantit une production fiable et continue, tout en assurant la qualité des produits laitiers ainsi que la sécurité des installations.

2.3.5 Indicateurs de performance existants

Pour assurer un suivi efficace des activités industrielles, l'usine Trèfle met en place un ensemble d'indicateurs de performance couvrant plusieurs domaines clés : la productivité, la maintenance, la qualité et la logistique. Ces indicateurs permettront d'évaluer de manière précise et continue les performances de chaque secteur, facilitant ainsi la prise de décisions et l'amélioration continue des processus.

2.3.5.1 Indicateurs de maintenance

MTBF (Mean Time Between Failures)

- Définition : Temps moyen entre deux pannes d'un équipement.
- Objectif : Évaluer la fiabilité des machines.

MTTR (Mean Time To Repair)

- Définition : Temps moyen de réparation après une panne.
- Objectif : Mesurer la rapidité d'intervention du service maintenance.

Taux de disponibilité (%)

- Définition : Rapport entre le temps de fonctionnement et le temps total.
- Objectif : Mesurer la disponibilité des équipements.

Taux de pannes

- Définition : Nombre de pannes sur une période donnée.
- Objectif : Identifier les équipements critiques.

2.3.5.2 Indicateurs de production

- **Taux de rendement global (TRG / OEE)**
  Mesure la performance globale des équipements en intégrant la disponibilité, la performance et la qualité.

- **Volume de production**
  Quantité totale des produits fabriqués, par exemple : lait, yaourt, fromage.

- **Taux d'utilisation des machines (%)**
  Rapport entre le temps réel de fonctionnement des machines et le temps total disponible.

- **Taux de rebut (%)**
  Pourcentage des produits fabriqués qui ne sont pas conformes aux standards qualité.

2.3.5.3 Indicateurs de qualité

- **Taux de conformité (%)**
  Pourcentage de produits respectant les normes et spécifications établies.

- **Nombre de non-conformités**
  Quantité de défauts ou anomalies détectés pendant la production ou lors des contrôles en laboratoire.

- **Taux de réclamations clients**
  Proportion des plaintes clients par rapport au volume total des ventes.

- **Résultats des analyses microbiologiques**
  Suivi des paramètres sanitaires et microbiologiques pour garantir la sécurité des produits.

2.3.5.4 Indicateurs logistiques

- **Taux de rotation des stocks**
  Mesure la fréquence à laquelle les stocks sont renouvelés sur une période donnée.

- **Taux de rupture de stock**
  Indique la fréquence des indisponibilités de produits ou de matières premières.

- **Délai de livraison**
  Correspond au temps écoulé entre la passation de la commande et la réception effective des produits.

2.3.5.5 Indicateurs financiers

- **Coût de maintenance**
  Ensemble des dépenses liées à l'entretien, la réparation et la maintenance des équipements.

- **Coût de production unitaire**
  Coût total engagé pour produire une seule unité de produit, incluant matières premières, main-d'œuvre, énergie, etc.

- **Chiffre d'affaires**
  Montant total des revenus générés par la vente des produits sur une période donnée.

Ces indicateurs offrent à l'usine Trèfle un outil précieux pour piloter ses performances opérationnelles. Ils facilitent l'identification rapide des dysfonctionnements et orientent la mise en œuvre d'actions d'amélioration continue. Grâce à ce suivi rigoureux, l'usine peut optimiser à la fois sa production et la qualité de ses produits, assurant ainsi sa compétitivité et la satisfaction de ses clients

2.4 Diagnostic initial

2.4.1 Analyse des arrêts de production

Les arrêts de production impactent fortement la performance globale de l'usine Trèfle. Leur étude permet d'identifier les causes principales des interruptions et d'adopter des mesures correctives adaptées.

Types d'arrêts

- Arrêts planifiés : maintenance préventive, nettoyage, changements de production.
- **Arrêts non planifiés :** pannes techniques, défaillances des équipements, problèmes organisationnels.

Constats principaux

- Les arrêts non planifiés sont majoritairement dus à des défaillances mécaniques, électriques ou à un manque de maintenance préventive.
- Ces arrêts entraînent des pertes de production, une baisse de productivité et une hausse des coûts.

Recommandations pour réduire les arrêts

- Renforcer la maintenance préventive.
- Améliorer la planification des interventions.
- Former le personnel technique.
- Utiliser des indicateurs de performance pour suivre les arrêts.
- Mettre en place un système de suivi historique des pannes.

2.4.2 Typologie des pannes

Les pannes des équipements industriels se classent en fonction de leur nature et de leur origine. Cette classification facilite la compréhension des défaillances et permet de définir des actions de maintenance appropriées.

1. Pannes mécaniques

Les pannes mécaniques affectent les composants mécaniques des machines, tels que les roulements, les pompes, les courroies et les engrenages.

- Causes principales : usure, manque de lubrification, surcharge ou mauvaise utilisation.

Pannes électriques

Les pannes électriques concernent les composants électriques tels que les moteurs, les câbles et les armoires électriques.

Causes principales : court-circuit, surtension, défaillance des composants.

Pannes d'automatisme

Les pannes d'automatisme concernent les systèmes de commande, tels que les automates programmables, les capteurs et les variateurs.

Causes principales : défaut de programmation, capteurs défectueux, ou problèmes de communication.

Pannes humaines

Les pannes humaines résultent d'erreurs d'exploitation ou d'un manque de formation.

- Causes principales : mauvaise manipulation, non-respect des procédures

2.4.3 Identification des équipements sensibles

L'identification des équipements sensibles est une étape cruciale dans l'analyse de la maintenance industrielle. Elle vise à repérer les équipements critiques dont la défaillance peut provoquer des arrêts de production, des pertes économiques significatives ou des risques pour la sécurité.

-Les équipements sensibles sont généralement identifiés selon plusieurs critères, notamment :

- Criticité de l'équipement : impact de la panne sur la production (arrêt total ou partiel).
- Fréquence des pannes : équipements sujets à des défaillances répétitives.
- Temps de réparation (MTTR) : durée nécessaire pour remettre l'équipement en service.
- Coût de maintenance : dépenses liées à l'entretien et aux réparations.
- Disponibilité des pièces de rechange : difficultés d'approvisionnement pouvant prolonger les arrêts.

-Dans une installation industrielle, les équipements fréquemment considérés comme sensibles comprennent :

- Les pompes et moteurs,
- Les échangeurs thermiques,
- Les systèmes de commande et d'automatisme,
- Les lignes de conditionnement,
- Les installations de refroidissement.

L'identification de ces équipements permet de prioriser les actions de maintenance, de renforcer la maintenance préventive et d'optimiser la gestion des ressources.

2.4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'entreprise TRÈFLE, son organisation industrielle et les caractéristiques de ses lignes de production. L'analyse du service maintenance et des contraintes techniques a permis d'avoir une meilleure compréhension du fonctionnement de l'entreprise et d'identifier les équipements sensibles nécessitant une attention particulière dans la stratégie de maintenance préventive.

Chapitre 3 : Modélisation d'un indicateur de priorisation de la maintenance préventive des équipements agroalimentaires

Introduction

Un environnement agroalimentaire caractérisé par des exigences élevées en matière de sécurité sanitaire, de qualité des produits et de continuité de production, la gestion efficace de la maintenance constitue un enjeu stratégique majeur. Contrairement aux approches classiques basées uniquement sur des périodicités fixes, Dans ce chapitre, nous proposons un modèle d'aide à la décision basé sur un indicateur de performance intitulé **Indicateur de Priorisation de la Maintenance des Équipements Agroalimentaires (IPMEA)**. Une approche fondée sur la criticité des équipements permet d'optimiser les ressources de maintenance et de réduire les risques industriels. Nous présentons les paramètres en détaille lors de l'élaboration du modèle.

3.1 Le modèle mathématique

Le modèle IPMEA repose sur une approche multicritère combinant des paramètres qualitatifs et quantitatifs permettant d'évaluer la criticité des équipements. Il intègre un ensemble de **13 paramètres**, sélectionnés sur la base de la littérature scientifique et des exigences industrielles du secteur agroalimentaire (Voir tableau 3.1). La figure 3.1 représente les paramètres sélectionnés et leurs facteurs de pondération (R). Les paramètres liés à la sécurité alimentaire, à la criticité du processus et à la fréquence des pannes sont fortement pondérés, tandis que les paramètres logistiques ont une pondération modérée.

Tableau 3-1: Les paramètres sélectionnés et leurs facteurs de pondération (R)

N°	Critère	Poids (R)
1	Fonction de l'équipement dans le procédé	10
2	Type d'équipement agroalimentaire	8
3	Localisation dans la ligne / zone hygiénique	5
4	Risque de conséquence d'une défaillance	15
5	Âge de l'équipement	7
6	Taux d'utilisation	8
7	Complexité de la maintenance / exigence hygiénique	8
8	Fréquence des pannes	10
9	Coût de maintenance / réparation	5
10	Causes de mise hors service	6
11	Durée des arrêts (down time)	8
12	Disponibilité d'équipements de secours / redondance	5

13	Disponibilité de l'équipe de maintenance spécialisée	5
Total		100

Ces paramètres sont pondérés en fonction de leur importance relative dans le processus de production et leur impact sur :la sécurité alimentaire, la qualité du produit, la continuité de production et les coûts de maintenance.

La pondération globale est fixée à 100 %, garantissant un équilibre entre les différents facteurs influençant la criticité.

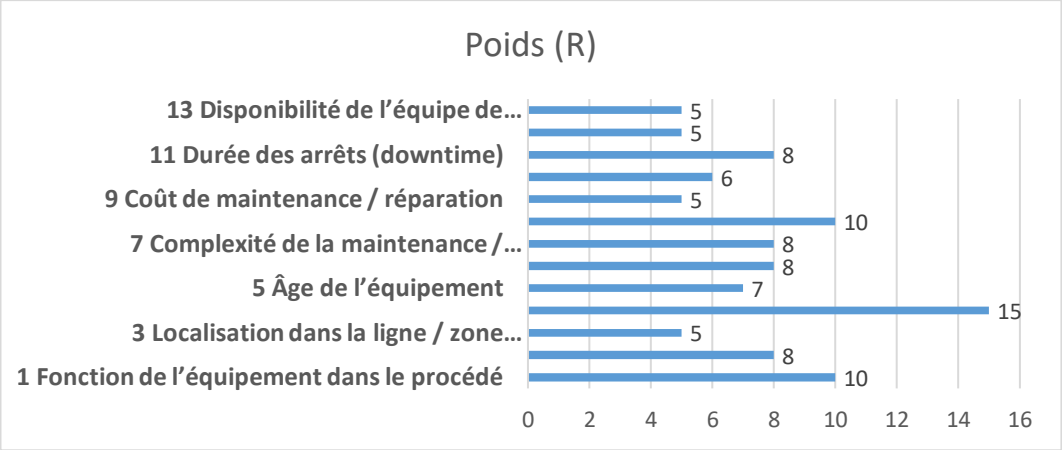

Figure 3-1: Paramètres qualitative de modèle proposé

3.1.1 Paramètres du modèle IPMEA

Paramètre 1 : Fonction de l'équipement dans le procédé

Le paramètre « fonction de l'équipement dans le procédé » représente le rôle opérationnel de chaque équipement au sein de la chaîne de production agroalimentaire. Il constitue un critère fondamental dans l'évaluation de la criticité, car il permet d'identifier l'impact direct d'un équipement sur la transformation du produit, la qualité finale et la continuité du processus industriel.

Ce paramètre décrit la contribution de l'équipement au déroulement du procédé de production. Il permet de distinguer les équipements intervenant directement dans les opérations critiques de transformation de ceux assurant des fonctions de support. Plus la fonction de l'équipement est liée à une étape sensible du procédé, plus sa criticité est élevée.

Tableau 3-2:Niveaux d'importance de critères « Fonction de l'équipement dans le procédé »

Fonction	**Description**	**Niveaux d'importance (S)**
Équipement critique de transformation	Pasteurisation, stérilisation, UHT	5

Équipement de conditionnement primaire	Remplissage, emballage	4
Équipement de transfert	Pompes, convoyeurs	3
Équipement auxiliaire	Utilités secondaires	2
Équipement non critique	Support	1

Paramètre 2 : Type d'équipement agroalimentaire

Ce paramètre caractérise la nature technologique de l'équipement et son rôle dans le système productif. Certains équipements présentent un effet direct sur la qualité et la sécurité du produit, alors que d'autres remplissent une fonction de support. La classification par type permet ainsi de mieux apprécier la sensibilité technique de l'équipement.

Tableau 3-3:Niveaux d'importance du critère « Type d'équipement agroalimentaire »

Type d'équipement	**Description**	**Niveau d'importance (S)**
Équipement thermique critique	Pasteurisateur, stérilisateur, UHT	5
Équipement de conditionnement	Remplisseuse, emballeuse	4
Équipement frigorifique	Groupe froid, chambre froide, refroidisseur	4
Équipement de transfert	Pompes, convoyeurs	3
Équipement utilitaire	Chaudière, compresseur, air comprimé	3
Équipement auxiliaire	Agitateur, mélangeur secondaire	2
Équipement de support	Instruments non critiques, accessoires	1

Paramètre 3 : Localisation de l'équipement dans le processus

La localisation renseigne sur la position de l'équipement dans la chaîne de production. Un équipement situé dans une zone critique, telle qu'une section de traitement thermique ou de conditionnement aseptique, exerce une influence plus forte sur la continuité du procédé et sur la sécurité des denrées.

Tableau 3-4:Niveaux d'importance du critère « Localisation de l'équipement dans le processus »

Localisation	**Description**	**Niveau d'importance (S)**
Zone critique de transformation	Pasteurisation, UHT, stérilisation	5
Zone de conditionnement primaire	Remplissage aseptique, fermeture	4
Zone de transfert interne	Convoyage, pompage, transfert matière	3

Zone utilitaire	Vapeur, air comprimé, eau industrielle	2
Zone secondaire ou support	Atelier annexe, stockage, assistance	1

Paramètre 4 : Risque de conséquence d'une défaillance

Ce paramètre représente la gravité des conséquences d'une panne. Dans l'industrie agroalimentaire, une défaillance peut provoquer une contamination du produit, une non-conformité réglementaire, une perte de lot ou un arrêt de ligne. Ce critère constitue l'un des plus déterminants du modèle.

Tableau 3-5Niveaux d'importance du critère « Risque de conséquence d'une défaillance »

Conséquence potentielle	**Description**	**Niveau d'importance (S)**
Contamination ou risque sanitaire majeur	Produit impropre à la consommation	5
Non-conformité grave	Rejet de lot, blocage de production	4
Dégradation de qualité	Défaut organoleptique ou technique	3
Retard de production	Pertes de temps, réorganisation	2
Impact faible	Conséquence limitée sur le procédé	1

Âge de l'équipement

L'âge constitue un indicateur indirect de l'usure et de la probabilité de défaillance. Plus l'équipement est ancien, plus la fréquence d'intervention et le risque de panne augmentent, surtout en cas d'exploitation intensive.

Tableau 3-6: Niveaux d'importance du critère « Âge de l'équipement »

Âge de l'équipement	**Niveau d'importance (S)**
Plus de 10 ans	5
Entre 7 et 10 ans	4
Entre 5 et 6 ans	3
Entre 3 et 4 ans	2
Moins de 3 ans	1

Paramètre 6 : Taux d'utilisation

Le taux d'utilisation reflète la fréquence de sollicitation de l'équipement dans le cycle de production. Un équipement utilisé en continu est davantage exposé à l'usure, aux dérives de réglage et aux pannes répétitives.

Tableau 3-7: Niveaux d'importance du critère « Taux d'utilisation »

Fréquence d'utilisation	**Niveau d'importance (S)**
Utilisation continue / 24 h sur 24	5
Utilisation quotidienne	4
Utilisation hebdomadaire	3
Utilisation occasionnelle	2
Utilisation rare	1

Paramètre 7 : Complexité de la maintenance

Ce paramètre mesure la difficulté technique des opérations de maintenance. Certains équipements exigent un démontage complexe, des compétences spécialisées, des procédures hygiéniques strictes ou des réglages fins. Cette complexité influe sur le délai d'intervention, le coût et la disponibilité du personnel qualifié.

Tableau 3-8: Niveaux d'importance du critère « Complexité de la maintenance »

Niveau de complexité	**Description**	**Niveau d'importance (S)**
Très complexe	Intervention spécialisée, démontage lourd, hygiène stricte	5
Complexe	Nécessite expertise technique avancée	4
Modérée	Intervention structurée mais accessible	3
Simple	Maintenance standard	2
Très simple	Opérations élémentaires	1

Paramètre 8 : Fréquence des pannes

La fréquence des pannes traduit la fiabilité réelle de l'équipement sur une période donnée. Elle constitue une base objective pour identifier les équipements les plus instables et les plus coûteux en maintenance corrective.

Tableau 3-9: Niveaux d'importance du critère « Fréquence des pannes »

Fréquence des pannes	**Niveau d'importance (S)**

Plus de 10 pannes	5
Entre 8 et 10 pannes	4
Entre 5 et 7 pannes	3
Entre 2 et 4 pannes	2
1 seule panne	1
Aucune panne	0

Paramètre 9 : Coût de maintenance ou de réparation

Ce paramètre prend en compte le coût total nécessaire pour remettre l'équipement en état de fonctionnement. Il inclut les pièces de rechange, la main-d'œuvre, les consommables et, si nécessaire, l'intervention d'un prestataire externe.

Tableau 3-10:Niveaux d'importance du critère « Coût de maintenance ou de réparation »

Coût de maintenance / réparation	Niveau d'importance (S)
Élevé : supérieur à 10 % du coût d'achat	5
Moyen : entre 5 % et 10 % du coût d'achat	3
Faible : inférieur à 5 % du coût d'achat	1

Paramètre 10 : Causes de mise hors service

Ce paramètre identifie les facteurs à l'origine de l'indisponibilité de l'équipement. Il permet de distinguer les arrêts dus à des causes techniques, organisationnelles ou logistiques, et d'orienter les actions correctives.

Tableau 3-11: Niveaux d'importance du critère « Causes de mise hors service »

Cause de mise hors service	Niveau d'importance (S)
Manque de matériaux / pièces de rechange	6
Manque d'outillage / mauvaise utilisation	5
Manque de technicien / défaut constructeur	4
Problème logiciel / besoin d'étalonnage	3
Manque de documentation	2
Autres causes	1
Aucun arrêt / simple retard de maintenance	0

Paramètre 11 : Durée des temps d'arrêt

La durée d'arrêt représente le temps total d'indisponibilité de l'équipement sur une période donnée. Un arrêt prolongé peut entraîner des pertes de production, des perturbations logistiques et des risques de non-respect des délais de livraison.

Tableau 3-12: Niveaux d'importance du critère « Durée des temps d'arrêt »

Durée d'indisponibilité annuelle	Niveau d'importance (S)
Plus de 200 jours	5
Entre 100 et 200 jours	4
Entre 60 et 99 jours	3
Entre 20 et 59 jours	2
Moins de 20 jours	1
Aucune indisponibilité	0

Paramètre 12 : Nombre d'équipements de secours disponibles

Ce paramètre évalue le niveau de redondance disponible pour assurer la continuité de production en cas de défaillance. Lorsqu'aucun équipement de secours n'est disponible, la criticité de l'équipement principal augmente fortement.

Tableau 3-13: Niveaux d'importance du critère « Nombre d'équipements de secours disponibles »

Nombre d'équipements de secours	Niveau d'importance (S)
Aucun équipement de secours	6
Un seul équipement de secours	5
Deux équipements de secours	4
Trois équipements de secours	3
Quatre équipements de secours	2
Cinq équipements ou plus	1

Paramètre 13 : Disponibilité de l'équipe de maintenance spécialisée

Ce paramètre mesure la capacité de l'organisation à mobiliser rapidement une équipe compétente pour intervenir sur l'équipement. La disponibilité d'un personnel qualifié permet de réduire les délais de remise en service et de limiter les coûts induits par l'arrêt.

Tableau 3-14: Niveaux d'importance du critère « Disponibilité de l'équipe de maintenance spécialisée »

Disponibilité de l'équipe spécialisée	Niveau d'importance (S)
Aucune équipe disponible, interne ou externe	5
Équipe externe disponible mais délai > 1 semaine	4
Équipe externe disponible sous 3 à 7 jours	3
Équipe interne partiellement qualifiée	2

Équipe interne spécialisée disponible en permanence	1

3.1.2 Formule mathématique de l'IPMEA

Afin de quantifier la criticité globale d'un équipement agroalimentaire, le modèle proposé repose sur une approche multicritère pondérée. Chaque paramètre contribue au score final selon son importance relative dans le procédé de production. L'indice obtenu, appelé **IPMEA** (*Indice de Priorisation de la Maintenance Préventive des Équipements Agroalimentaires*), permet de hiérarchiser les équipements et d'orienter les actions de maintenance préventive en fonction de leur niveau de criticité.

La formulation mathématique du modèle est donnée par :

$IPMEA = \frac{\sum_{i=1}^{13} Ri \times Si}{N}$ …… (3.1)

Où :

- Ri Représente le **poids** attribué au paramètre i, en fonction de son importance dans l'évaluation de la criticité ;
- Si Représente le **niveau de notation** attribué à l'équipement pour le paramètre i $avec\ i = \{1, \ldots, 13\}$.

La valeur obtenue est ensuite normalisée par division par un facteur de normalisation N, défini comme suit :

$N = \sum_{i=1}^{13} R_i \times S_{maxi} = R_1 \times S_{max1} + R_2 \times S_{max2} + \cdots + R_{13} \times S_{max13}$…. …… (3.2)

Ainsi, l'indice IPMEA est compris entre **0 et 1**, ce qui facilite son interprétation et la comparaison entre plusieurs équipements.

Interprétation du résultat

- IPMEA proche de 1 : équipement très critique, nécessitant une maintenance préventive renforcée ;
- IPMEA intermédiaire : équipement de criticité modérée, soumis à une surveillance régulière ;
- IPMEA proche de 0 : équipement faiblement critique, pouvant relever d'une stratégie de maintenance plus souple.

Expression développée

Si les 13 critères sont pris en compte, l'équation peut également s'écrire sous la forme :

$TPMEM = \frac{\sum_{i=1}^{13} \boldsymbol{Ri \times Si}}{\sum_{i=1}^{13} R_i \times S_{maxi}}$ …… (3.3)

3.1.3 Fréquence des interventions de maintenance

L'indice **IPMEA** ne constitue pas uniquement un outil de classement des équipements ; il sert également de base à la définition de la stratégie de maintenance préventive la plus appropriée pour chaque équipement. En effet, une fois les équipements hiérarchisés selon leur niveau de criticité, il devient possible d'associer à chaque classe une fréquence d'intervention cohérente avec son importance opérationnelle, son impact sur la sécurité alimentaire et son effet sur la continuité de production.

Dans le cadre de ce travail, une échelle de priorité à quatre niveaux est retenue afin de traduire les résultats du calcul de l'IPMEA en recommandations pratiques de maintenance. Cette classification a été établie de manière à faciliter la prise de décision par les responsables maintenance et à assurer une meilleure adéquation entre les ressources disponibles et les besoins réels des équipements.

Tableau 3-15: Fréquence des interventions de maintenance préventive selon l'IPMEA

Intervalle IPMEA	Priorité	Fréquence
0,75 – 1,00	Très élevée	2 interventions/an
0,50 – 0,74	Élevée	1 intervention/an
0,25 – 0,49	Faible	1 intervention tous les deux ans
0,00 – 0,24	Très faible	1 intervention tous les trois ans

Ainsi, les équipements présentant un indice IPMEA élevé doivent faire l'objet d'une surveillance renforcée et d'interventions préventives fréquentes, tandis que les équipements faiblement critiques peuvent être soumis à une périodicité plus espacée, voire à une maintenance corrective maîtrisée lorsque leur impact sur le procédé reste limité. Cette approche permet d'optimiser l'allocation des moyens humains, techniques et financiers tout en réduisant les risques d'indisponibilité et de non-conformité.

Cette grille d'interprétation permet de convertir l'indice de criticité en un plan d'action concret. Les équipements de priorité élevée, généralement associés aux opérations critiques de transformation ou de conditionnement, nécessitent une fréquence d'intervention plus rapprochée afin de prévenir les défaillances susceptibles d'affecter la qualité du produit ou d'interrompre la production. À l'inverse, les équipements de priorité très faible peuvent être

intégrés dans un programme de surveillance allégé, sans compromettre significativement la performance globale du système.

Conclusion

Ce chapitre a présenté le modèle **IPMEA**, un outil multicritère permettant de hiérarchiser les équipements agroalimentaires selon leur criticité. Basé sur treize paramètres intégrant des dimensions techniques, économiques et sanitaires, ce modèle transforme des données qualitatives et quantitatives en un indicateur normalisé facilitant la prise de décision.

L'IPMEA permet ainsi d'orienter efficacement la stratégie de maintenance préventive en fonction du niveau de risque de chaque équipement, contribuant à une meilleure allocation des ressources, à la réduction des arrêts non planifiés et à l'amélioration de la performance industrielle. Toutefois, la pertinence du modèle dépend de la qualité des données et de l'expertise mobilisée. Son application à un cas industriel réel, présentée dans le chapitre suivant, permettra de valider son efficacité au niveau de l'entreprise TRÈFLE (SPA Laiterie Sidi Saada).

Chapitre 4 : Application et validation du modèle IPMEA : Cas de TRÈFLE

Introduction

Cette partie présente l'application pratique du modèle IPMEA développé dans le chapitre 3 au niveau de l'entreprise de TRÈFLE (SPA Laiterie Sidi Saada, Relizane). Elle permet de hiérarchiser les équipements de l'unité étudiée selon leur criticité, puis de traduire cette priorisation en un plan de maintenance préventive adapté.

L'objectif est de passer d'une évaluation multicritère à une stratégie opérationnelle de maintenance, cohérente avec les contraintes de production, de qualité sanitaire et de disponibilité des équipements.

4.1 Présentation du cas industriel étudié :

Figure 4-1: Situation géographique de la laiterie SIDI SAADA

4.1.1 Présentation de l'entreprise :

La filiale SPA laiterie SIDI SAADA est une entreprise spécialisée dans la production des produits laitiers, située dans la zone industrielle de YELLEL, wilaya RELIZANE sur une surface de 98.000 m. Elle est dirigée par le DG BENNAMEUR Abed et emploie 245 travailleurs

4.1.2 Description du processus de production

Le processus de production dans un industrie laitière comprend plusieurs étapes successives pour transformer le lait en produits finis conformes aux normes de qualité et sécurité alimentaire.

Le lait cru est réceptionné et contrôlé (température, acidité, teneur en matière grasse, propreté microbiologique). Après validation, il est stocké dans des cuves réfrigérées pour préserver ses qualités.

Le lait subit ensuite un traitement thermique, généralement la pasteurisation, pour éliminer les micro-organismes pathogènes tout en conservant ses propriétés nutritionnelles. Puis, l'homogénéisation stabilise la matière grasse et améliore la texture.

Selon le produit final (lait, yaourt, fromage), le lait est dirigé vers différentes lignes de transformation. Par exemple, pour le yaourt, une fermentation avec ferments lactiques est

réalisée, tandis que pour le fromage, des étapes comme la coagulation, le découpage du caillé et l'égouttage sont effectuées.

Enfin, le produit est conditionné dans des emballages adaptés en respectant des conditions d'hygiène strictes, puis stocké en chambre froide avant distribution.

4.2 Collecte et préparation des données

4.2.1 Sources des données de maintenance

- **Registres de maintenance :** documents internes dans lesquels sont reportées toutes les interventions (pannes, réparations, maintenance préventive).
- **Les fiches d'intervention** : elles détaillent chaque panne (date, durée d'arrêt, nature de la défaillance…) avec les actions correctives mises en œuvre.
- **Observations terrain :** informations recueillies lors des visites et du suivi des équipements

4.2.2 Données historiques des pannes

Les données de pannes ont été relevées auprès du service maintenance sur une période donnée. Elles portent sur les équipements critiques et comportent la date, l'équipement, le type de panne, la durée d'arrêt et les actions réalisées. Ces informations, présentées sous forme de tableaux, ont permis d'identifier les pannes fréquentes et les équipements les plus défaillants. Même si certaines données sont incomplètes, elles restent suffisantes pour une analyse fiable du système de maintenance.

4.3 Calcul de l'IPMEA pour les équipements étudiés

Barème du modèle IPMEA — Indice de Priorisation de la Maintenance Préventive des Équipements Agroalimentaires					
Feuille de référence : pondérations, scores maximaux et logique d'interprétation					
N°	Critère	Poids (R)	Score max (Smax)	Orientation	Commentaire synthétique
1	Fonction de l'équipement dans le procédé	10	5	Plus élevé = plus critique	Plus la fonction est centrale dans la transformation, plus la criticité augmente.
2	Type d'équipement agroalimentaire	8	5	Plus élevé = plus critique	Équipements thermiques, aseptiques et frigorifiques sont prioritaires.
3	Localisation dans la ligne / zone hygiénique	5	5	Plus élevé = plus critique	Les zones critiques de transformation et de conditionnement sont plus sensibles.
4	Risque de conséquence d'une défaillance	15	5	Plus élevé = plus critique	Sécurité alimentaire, non-conformité, perte de lot, arrêt de ligne.
5	Âge de l'équipement	7	5	Plus élevé = plus critique	L'ancienneté augmente généralement le risque de panne.
6	Taux d'utilisation	8	5	Plus élevé = plus critique	Un équipement utilisé en continu ou très fréquemment est plus critique.
7	Complexité de la maintenance / exigence hygiénique	8	5	Plus élevé = plus critique	La complexité technique et sanitaire influence le délai d'intervention.
8	Fréquence des pannes	10	5	Plus élevé = plus critique	Historique des défaillances observées sur la période étudiée.
9	Coût de maintenance / réparation	5	5	Plus élevé = plus critique	Pièces, main-d'œuvre, sous-traitance, arrêts induits.
10	Causes de mise hors service	6	6	Plus élevé = plus critique	Pièces, outillage, erreur d'exploitation, calibration, documentation.
11	Durée des arrêts (downtime)	8	5	Plus élevé = plus critique	Plus l'indisponibilité est longue, plus la criticité est élevée.
12	Disponibilité d'équipements de secours / redondance	5	6	Plus faible = plus critique	Absence de secours = criticité forte.
13	Disponibilité de l'équipe de maintenance spécialisée	5	5	Plus élevé = plus critique	Une équipe disponible rapidement réduit la criticité.
Total		100	511		

Figure 4-2 : Le calcul de l'IPMEA pour les équipements étudiés sur EXEL

4.3.1 Classement des équipements selon leur criticité

Tableau 4-1: classement le premier 5 équipement selon leur criticité

Range	Code	Équipement	IPMEA	Priorité
1	TL8	La machine ERFCA EF 480S (plus de 10 ans)	0.961	Très élevée
2	TP1	Pasteurisateur HTST	0.873	Très élevée
3	TH1	Homogénéisateur	0.814	Très élevée
4	CS1	Souffleuse KHS	0.804	Très élevée
5	TE1	Evaporateur	0.800	Très élevée

Ces cinq équipements ont le niveau de criticité le plus élevé du système de production. Leur panne entraîne des arrêts non négligeables, des pertes économiques importantes et a un impact direct sur la qualité du produit et la continuité de la production. Ils doivent donc être considérés comme prioritaires dans le programme de maintenance préventive et le suivi technique.

4.3.2 Analyse des résultats obtenus

L'analyse des résultats montre que les cinq premiers équipements classés selon leur criticité sont les plus importants dans le processus de production. Il s'agit de la **machine ERFCA EF 480S**, du **pasteurisateur HTST**, de l'homogénéisateur, de la **souffleuse KHS** et de l'évaporateur. Ces équipements ont un indice **IPMEA** très élevé, ce qui signifie qu'ils ont une grande influence sur la continuité de la production.
Leur défaillance peut entraîner des arrêts importants, des pertes économiques et une diminution de la qualité du produit final. La machine **ERFCA EF 480S** est ancienne et de plus en plus souvent en panne, tandis que le **pasteurisateur HTST** et l'homogénéisateur sont essentiels à la phase de transformation.**la soufflette KHS** ainsi que l'évaporateur ont également un rôle stratégique dans le traitement et le conditionnement du produit.
Ces résultats indiquent que ces équipements doivent faire l'objet d'une maintenance préventive prioritaire afin d'assurer la disponibilité des installations et de limiter les arrêts non programmés.

4.4 Élaboration du plan de maintenance préventive

L'élaboration du plan de maintenance préventive constitue l'étape opérationnelle centrale de la démarche IPMEA. Elle vise à traduire les indices de criticité calculés pour l'ensemble des 41 équipements du parc machine de la laiterie TRÈFLE (SPA Laiterie Sidi Saada, Relizane) en un programme d'actions structuré, réaliste et directement exploitable par le service maintenance.

Ce plan intègre quatre dimensions complémentaires : la **définition des stratégies adaptées à chaque niveau de criticité**, la **détermination des fréquences d'intervention**, l'**affectation des actions spécifiques par équipement** et l'établissement d'un **planning préventif annuel**. La classification IPMEA distingue quatre niveaux de priorité : très élevée (IPMEA ≥ 0,75), élevée (0,50–0,74), faible (0,25–0,49) et très faible (< 0,25), regroupant respectivement 10, 18, 9 et 4 équipements.

4.4.1 Définition des stratégies de maintenance par niveau de criticité

La stratégie de maintenance adoptée pour chaque équipement doit être proportionnelle à son niveau de criticité IPMEA. Quatre stratégies distinctes sont définies, allant de la maintenance préventive systématique renforcée pour les équipements les plus critiques, jusqu'à la maintenance corrective maîtrisée pour ceux présentant un faible impact sur la production et la sécurité alimentaire.

La stratégie pour les équipements de **priorité très élevée** (IPMEA ≥ 0,75) combine une maintenance préventive systématique renforcée avec une surveillance conditionnelle. Ces équipements — principalement les équipements de transformation thermique (pasteurisateur HTST, homogénéisateur, évaporateur), de conditionnement critique (ERFCA EF 480S, souffleuse KHS, Prepac) et les utilités essentielles (chaudière) — justifient une attention particulière en raison de leur impact direct sur la sécurité alimentaire et la continuité de production.

Les équipements de **priorité élevée** (IPMEA entre 0,50 et 0,74) bénéficient d'une maintenance préventive systématique accompagnée d'une surveillance périodique. Ce groupe, le plus nombreux avec 18 équipements, comprend les équipements de support de production tels que les cuves de maturation, les compresseurs, les capteurs et les équipements de conditionnement secondaire.

Pour les équipements de priorité faible et très faible, une maintenance allégée ou corrective maîtrisée est préconisée, avec des intervalles d'intervention s'étendant respectivement à deux ou trois ans. Ces équipements, essentiellement des auxiliaires et équipements de support, présentent un impact limité sur le procédé en cas de défaillance.

Tableau 4-2: Stratégies de maintenance préventive selon le niveau de criticité IPMEA

Priorité	IPMEA	Stratégie	Fréquence	Actions principales
Très élevée	0,75 – 1,00	Maintenance préventive systématique renforcée + surveillance conditionnelle	**3 interventions/an**	Inspection complète, lubrification, remplacement pièces d'usure, étalonnage, contrôle hygiénique, test fonctionnel
Élevée	0,50 – 0,74	Maintenance préventive systématique + surveillance périodique	**2 interventions/an**	Inspection visuelle et technique, lubrification, remplacement filtres/joints, étalonnage capteurs
Faible	0,25 – 0,49	Maintenance préventive allégée	**1 inter. /2 ans**	Inspection de routine, nettoyage, lubrification, vérification des fixations et connexions
Très faible	0,00 – 0,24	Maintenance corrective maîtrisée	**1 inter. /3 ans**	Inspection annuelle légère, maintenance corrective à la demande

4.4.2 Détermination des fréquences d'intervention

Les fréquences d'intervention sont directement déduites des intervalles IPMEA définis dans le modèle (Chapitre 3, Tableau 3.15). Pour la laiterie TRÈFLE, le tableau de répartition suivant synthétise le volume d'interventions annuelles à planifier pour l'ensemble du parc machine :

Tableau 4-3: Fréquences d'intervention et répartition temporelle par niveau de criticité

Priorité	Nb éq.	Fréquence	Mois d'intervention	Durée estimée	Observations
Très élevée	**10**	3 inters. /an	Jan – Mai – Sep	8–16 h	Intervention systématique + contrôle conditionnel si dérive détectée
Élevée	**18**	2 inters. /an	Jan – Juil	4–8 h	Inspection complète + remplacement préventif des composants à durée de vie limitée
Faible	**9**	1 inter. /2 ans	Jan (années impaires)	2–4 h	Inspection de routine + nettoyage et lubrification
Très faible	**4**	1 inter. /3 ans	Jan (cycle triennal)	1–2 h	Contrôle visuel léger, maintenance corrective à la demande

Volume total d'interventions annuelles : Le parc de 41 équipements génère un total estimé de **(10 × 3) + (18 × 2) + (9 × 0,5) + (4 × 0,33) ≈ 30 + 36 + 4,5 + 1,3 ≈ 72 interventions/an**. Ce volume confirme la nécessité d'une organisation rigoureuse du service maintenance, avec une charge de travail concentrée au premier semestre (janvier, mai/juillet) et une charge plus légère en fin d'année.

4.4.3 Affectation des actions de maintenance par équipement

Le tableau suivant détaille, pour chacun des 41 équipements du parc machine, les actions de maintenance spécifiques recommandées selon trois axes : la **maintenance corrective ciblée** (interventions post-défaillance préparées), la **maintenance préventive systématique** (actions

planifiées périodiquement) et la **surveillance conditionnelle** (monitoring en temps réel ou par inspection). Les équipements sont présentés par ordre décroissant de criticité IPMEA.

Le choix des actions pour chaque équipement a été établi sur la base : (1) des données historiques de pannes disponibles pour la laiterie TRÈFLE, (2) des recommandations des constructeurs, (3) des exigences spécifiques à l'industrie agroalimentaire (hygiène, traçabilité, continuité de la chaîne du froid), et (4) des contraintes de disponibilité du personnel et des pièces de rechange.

Tableau 4-4: Affectation des actions de maintenance par équipement (classement par ordre de criticité IPMEA décroissant)

Équipement	IPMEA	Priorité	Maintenance corrective ciblée	Maintenance préventive	Surveillance conditionnelle
Machine ERFCA EF 480S	**0.947**	**Très élevée**	Remplacement têtes thermiques, pistons pneumatiques	Nettoyage complet, étalonnage doseurs, contrôle soudures	Surveillance vibrations et températures
Pasteurisateur HTST	**0.873**	**Très élevée**	Remplacement joints haute température, plaques	Vérification températures pasteurisation, nettoyage CIP	Contrôle en ligne T°C et débit
Homogénéisateur	**0.814**	**Très élevée**	Remplacement pistons, clapets, joints haute pression	Lubrification pistons, vérification pression, alignement	Mesure pression différentielle
Souffleuse KHS	**0.804**	**Très élevée**	Remplacement lampes IR, moules, électrovannes	Nettoyage moules, réglage paramètres soufflage, lubrification	Contrôle pression air et température
Évaporateur	**0.800**	**Très élevée**	Remplacement tubes, joints d'étanchéité	Détartrage, contrôle niveau vide, étalonnage capteurs	Surveillance pression et débit

Équipement	IPMEA	Priorité	Maintenance corrective ciblée	Maintenance préventive	Surveillance conditionnelle
GEA Procomac	**0.779**	**Très élevée**	Remplacement buses, pompes dosage	Nettoyage têtes de dosage, étalonnage volumétrique	Contrôle volume et hygiène
Triblender (mélangeur de poudre)	**0.765**	**Très élevée**	Remplacement garnitures mécaniques, agitateur	Nettoyage complet, lubrification paliers, vérification étanchéité	Contrôle température de mélange
Prepac	**0.761**	**Très élevée**	Remplacement bobines, résistances de soudure, lames	Réglage soudure thermique, nettoyage têtes de soudage	Contrôle qualité soudure
Chaudière	**0.755**	**Très élevée**	Remplacement brûleur, tubes, soupapes sécurité	Contrôle pression vapeur, détartrage, contrôle combustion	Surveillance pression et flamme
Machine d'inspection de forme	**0.753**	**Très élevée**	Remplacement capteurs optiques, convoyeur	Nettoyage cellules optiques, étalonnage détection	Vérification taux de détection
Cuves de préparation/maturation	**0.687**	**Élevée**	Remplacement agitateurs, capteurs T°C/pH	Nettoyage CIP, étalonnage sondes, vérification isolation	Suivi T°C et pH
Échangeur / refroidisseur	**0.687**	**Élevée**	Remplacement plaques, joints	Détartrage, contrôle efficacité thermique, nettoyage	Mesure ΔT entrée/sortie

Équipement	IPMEA	Priorité	Maintenance corrective ciblée	Maintenance préventive	Surveillance conditionnelle
Compresseur 40 bar	**0.673**	Élevée	Remplacement pistons, soupapes, filtres	Changement huile, filtres air, contrôle pression	Surveillance vibrations et T°C
Vannes pneumatiques	**0.665**	Élevée	Remplacement sièges, joints, actionneurs	Test course, graissage, vérification étanchéité	Contrôle temps de réponse
Débitmètres	**0.659**	Élevée	Remplacement électrodes, transmetteurs	Étalonnage périodique, nettoyage électrodes	Vérification signal de sortie
Machine d'osmose inverse	**0.644**	Élevée	Remplacement membranes, filtres cartouches	Nettoyage chimique membranes, contrôle pression, qualité eau	Mesure conductivité perméat
Palettiseur	**0.638**	Élevée	Remplacement ventouses, pince, motoréducteurs	Lubrification axes, vérification cellules, étalonnage	Contrôle cadence et précision
Traitement des eaux	**0.618**	Élevée	Remplacement pompes, électrovannes	Vérification filtres, contrôle qualité eau, étalonnage	Analyse eau en continu
Vérins	**0.611**	Élevée	Remplacement joints, tiges	Lubrification, contrôle course et étanchéité	Mesure pression hydraulique
Capteurs de proximité	**0.585**	Élevée	Remplacement capteurs défaillants	Nettoyage, vérification distance de détection	Test signal périodique
Agitateurs	**0.577**	Élevée	Remplacement paliers, hélices, garnitures	Lubrification, contrôle vibrations et bruit	Mesure courant moteur

Équipement	IPMEA	Priorité	Maintenance corrective ciblée	Maintenance préventive	Surveillance conditionnelle
Capteurs inductifs	**0.571**	**Élevée**	Remplacement capteurs	Nettoyage, étalonnage, vérification fixation	Test de détection
Salle de froidissement	**0.569**	**Élevée**	Remplacement compresseur, détendeur	Nettoyage condenseur, contrôle charge frigorigène	Surveillance T°C et consommation
Fardeleuse	**0.681**	**Élevée**	Remplacement résistances, convoyeur film	Réglage température rétraction, nettoyage	Contrôle qualité d'emballage
Compresseur 7 bar	**0.532**	**Élevée**	Remplacement courroies, filtres, soupapes	Vidange huile, contrôle pression, purge condensats	Surveillance consommation air
Pompes centrifuges	**0.528**	**Élevée**	Remplacement garnitures, roulements	Alignement, lubrification, contrôle débits	Mesure vibration et débit
Dégazeur	**0.526**	**Élevée**	Remplacement vannes, joints	Nettoyage, contrôle niveau et pression	Surveillance taux O2 dissous
Onduleurs	**0.523**	**Élevée**	Remplacement cartes, batteries	Test bascule, vérification batteries, nettoyage filtres	Mesure tension sortie
CTA (central traitement d'air)	**0.499**	**Faible**	Remplacement filtres, courroies	Nettoyage filtres, réglage hygrométrie	Contrôle paramètres d'air
Convoyeurs	**0.474**	**Faible**	Remplacement bandes, galets	Lubrification, contrôle tension bande	Inspection visuelle
Adoucisseur d'eau	**0.466**	**Faible**	Remplacement résine	Régénération résine, contrôle dureté	Analyse dureté eau

Équipement	IPMEA	Priorité	Maintenance corrective ciblée	Maintenance préventive	Surveillance conditionnelle
Groupe électrogène	**0.462**	**Faible**	Remplacement filtres, batterie démarrage	Test mensuel, vidange huile, vérification niveaux	Test de charge annuel
Pompes (transfert)	**0.464**	**Faible**	Remplacement joints, garnitures	Lubrification, contrôle débit	Mesure pression
Adoucisseur interne	**0.413**	**Faible**	Remplacement résine, vannes	Régénération, contrôle dureté sortie	Analyse eau
Banderoleuse (filmage palette)	**0.442**	**Faible**	Remplacement moteur rotation, film	Lubrification, réglage tension film	Inspection visuelle
Lave-bottes automatique	**0.346**	**Faible**	Remplacement brosses, pompe	Nettoyage bac, renouvellement solution	Contrôle concentration
Ventilateur d'extraction	**0.317**	**Faible**	Remplacement courroie, paliers	Nettoyage grilles, lubrification paliers	Contrôle débit d'air
Transpalette manuel	**0.239**	**Très faible**	Remplacement roues, vérin hydraulique	Lubrification annuelle, vérification structure	Inspection visuelle
Convoyeur gravitaire	**0.243**	**Très faible**	Remplacement galets	Inspection et graissage tous les 3 ans	Inspection visuelle
Table conditionnement inox	**0.243**	**Très faible**	Remplacement fixations	Nettoyage, contrôle intégrité structure	Inspection visuelle
Pompe transfert eau nettoyage	**0.243**	**Très faible**	Remplacement joints	Contrôle débit, lubrification	Inspection visuelle

Abréviations : CIP = Cleaning In Place (nettoyage en place) ; T°C = température ; ΔT = différence de température ; O2 = oxygène dissous. Les durées et fréquences d'actions

constituent des recommandations minimales pouvant être renforcées selon les retours d'expérience du service maintenance.

4.4.4 Proposition du planning préventif annuel

Le planning préventif annuel traduit les fréquences d'intervention définies en section 4.4.2 en un calendrier mensuel pratique pour le service maintenance. Il offre une vision globale des échéances d'intervention sur l'année et permet d'anticiper les pics de charge de travail, de mobiliser les ressources en conséquence et d'éviter les chevauchements d'interventions simultanées sur les équipements critiques.

Pour les équipements de priorité très élevée, trois interventions annuelles sont programmées en janvier, mai et septembre, assurant une répartition équilibrée sur les trois trimestres actifs de production. Les équipements de **priorité élevée** sont traités en janvier et juillet, permettant une révision semestrielle cohérente avec les arrêts planifiés de la laiterie

.

Tableau 4-5: Planning préventif annuel (15 équipements représentatifs par ordre de criticité)

Équipement	IPMEA	Priorité	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
Machine ERFCA EF 480S	**0.947**	**Très élevée**	✓	✓			✓				✓			
Pasteurisateur HTST	**0.873**	**Très élevée**	✓	✓			✓				✓			
Homogénéisateur	**0.814**	**Très élevée**	✓	✓			✓				✓			
Souffleuse KHS	**0.804**	**Très élevée**	✓	✓			✓				✓			
Évaporateur	**0.800**	**Très élevée**	✓	✓			✓				✓			
GEA Procomac	**0.779**	**Très élevée**	✓	✓			✓				✓			
Triblender (mélangeur de poudre)	**0.765**	**Très élevée**	✓	✓			✓				✓			
Prepac	**0.761**	**Très élevée**	✓	✓			✓				✓			
Chaudière	**0.755**	**Très élevée**	✓	✓			✓				✓			
Machine d'inspection de forme	**0.753**	**Très élevée**	✓	✓			✓				✓			
Cuves de préparation et maturation	**0.687**	**Élevée**	✓						✓					
Échangeur / refroidisseur	**0.687**	**Élevée**	✓						✓					
Compresseur 40 bar	**0.673**	**Élevée**	✓						✓					
Vannes pneumatiques	**0.665**	**Élevée**	✓						✓					
Débitmètres	**0.659**	**Élevée**	✓						✓					

Conclusion de la section 4.4

Le plan de maintenance préventive élaboré dans cette section constitue la traduction opérationnelle directe des résultats du calcul IPMEA. En associant à chaque niveau de criticité une stratégie adaptée, des fréquences d'intervention calibrées et des actions spécifiques documentées, il offre au service maintenance de la laiterie TRÈFLE un outil de pilotage structuré et immédiatement applicable.

Les dix équipements de priorité très élevée — concentrant les enjeux les plus critiques de la production et de la sécurité alimentaire — font l'objet d'une surveillance renforcée avec trois interventions préventives annuelles. Les dix-huit équipements de priorité élevée bénéficient d'un programme semestriel, tandis que les équipements moins critiques sont intégrés dans des cycles biennaux ou triennaux.

Ce plan représente un changement de paradigme significatif pour la laiterie, passant d'une approche majoritairement corrective à une stratégie de maintenance basée sur la criticité réelle des équipements. Son impact technico-économique

4.5 Proposition des opérations de maintenance par famille d'équipements

Tableau 4-6: Proposition des opérations de maintenance par famille d'équipements

Famille	Type dominant	Fréquence suggérée
Transformation	Préventif / Prédictif	Mensuel à Trimestriel
Conditionnement	Préventif / Systématique	Hebdomadaire (Graissage) à Annuel
Transfert	Préventif	Semestriel
Utilitaire	Prédictif	Annuel
Auxiliaires	Correctif	À la demande

4.6 Évaluation technico-économique de la stratégie de maintenance basée sur l'IPMEA

Dans le cadre de l'optimisation de la maintenance industrielle à la Laiterie TRÈFLE (Sidi Saada), l'évaluation économique constitue une étape essentielle permettant de mesurer l'impact réel des stratégies mises en œuvre. L'introduction du modèle IPMEA (Indice de Priorisation de la Maintenance Préventive des Équipements Agroalimentaires) vise non seulement à améliorer

la fiabilité et la disponibilité des équipements, mais également à optimiser les coûts globaux de maintenance.

Cette section compare les coûts de maintenance avant et après l'implémentation du modèle IPMEA, sur un parc de 41 équipements répartis en six familles fonctionnelles (Transformation, Conditionnement, Transfert, Utilitaire, Support, Interne). L'objectif est d'évaluer les gains économiques générés et de justifier la pertinence de l'approche proposée.

Note méthodologique : En l'absence de données comptables exhaustives disponibles pour ce travail académique, les coûts présentés dans cette section constituent des estimations approximatives fondées sur les références tarifaires du marché algérien des équipements agroalimentaires, les ratios normalisés de la maintenance industrielle (2 à 5 % de la valeur de remplacement par an pour la maintenance courante), ainsi que les scores de criticité IPMEA et les historiques de pannes intégrés dans le modèle. Ces valeurs sont données à titre indicatif et permettent de démontrer la démarche de raisonnement économique propre à l'évaluation d'un plan de maintenance préventive.

4.6.1 Structure des coûts de maintenance

Le coût global de maintenance d'un équipement peut être décomposé en cinq composantes principales, conformément au modèle de coût total adopté dans cette étude :

$$C_total = C_corrective + C_préventive + C_arrêt + C_main - d'œuvre + C_pièces$$

Où :

— $C_corrective$ **:** coût des interventions correctives (réparations suite à pannes).

— $C_préventive$ **:** coût des actions planifiées (inspections, remplacements préventifs).

— $C_arrêt$ **:** coût lié aux pertes de production générées par les indisponibilités.

— $C_main - d'œuvre$ **:** coût du personnel de maintenance (techniciens internes et sous-traitants).

— $C_pièces$ **:** coût des pièces de rechange et consommables.

Le coût total avant optimisation (C_avant) et après optimisation (C_après) sont respectivement exprimés par :

$$C_avant = \Sigma\,(j = 1 \rightarrow n)\; C_avant, j$$

$$C_après = \Sigma\,(j = 1 \rightarrow n)\; C_total\ optimisé, j$$

Où n = 41 représente le nombre d'équipements étudiés dans le parc machine de la Laiterie TRÈFLE.

4.6.2 Évaluation des coûts avant l'application de l'IPMEA

Avant l'implémentation du modèle IPMEA, la politique de maintenance à la Laiterie TRÈFLE est dominée par une approche corrective ou semi-préventive, caractérisée par une fréquence élevée de pannes non anticipées, des arrêts de production non planifiés, une faible priorisation des interventions et une sous-utilisation des ressources de maintenance préventive.

Dans ce contexte, la maintenance corrective représente la part prépondérante des dépenses, tandis que les coûts d'arrêt de production constituent le poste le plus lourd, en raison des pertes de lot et des non-conformités induites. Le coût total estimé avant IPMEA pour l'ensemble du parc s'élève à :

$\boldsymbol{C_avant}$ **= 55 095 000 DA/an**

4.6.3 Évaluation des coûts après l'application de l'IPMEA

Après l'introduction du modèle IPMEA, les équipements sont classés selon leur criticité en quatre niveaux (Très élevée, Élevée, Faible, Très faible), ce qui permet d'affecter des fréquences d'intervention différenciées et d'allouer les ressources de maintenance de façon optimale. Les effets attendus sont une augmentation maîtrisée des activités préventives, une réduction significative des pannes imprévues, une diminution des coûts d'arrêt de production et une meilleure planification des approvisionnements en pièces de rechange.

Le coût total estimé après IPMEA pour l'ensemble du parc est :

$\boldsymbol{C_après}$ **= 25 051 000 DA/an**

4.6.4 Calcul des gains économiques

Le gain économique généré par l'application du modèle IPMEA est calculé comme suit :

$$\boldsymbol{Gain = C_avant - C_après}$$

$$\boldsymbol{Gain = 55\,095\,000 - 25\,051\,000 = 30\,044\,000\ DA/an}$$

Le taux de réduction des coûts est donné par :

$$\boldsymbol{Taux\ de\ gain\ (\%) = [(C_avant - C_après) / C_avant] \times 100}$$

$$\boldsymbol{Taux\ de\ gain = [30\,044\,000 / 55\,095\,000] \times 100 \approx 54.5\ \%}$$

Cela représente une économie annuelle estimée à 30 044 000 DA, soit une réduction de 54.5 % du coût total de maintenance. Ce résultat met en évidence l'intérêt économique majeur d'une stratégie basée sur la criticité IPMEA comparativement à l'approche corrective dominante.

4.6.5 Tableaux comparatifs des coûts

4.6.5.1 Comparaison des coûts par type

Le tableau suivant synthétise la comparaison des coûts de maintenance par catégorie, avant et après l'implémentation du modèle IPMEA, pour l'ensemble du parc de 41 équipements.

Tableau 4-7: Comparaison des coûts de maintenance avant et après IPMEA (valeurs estimatives, DA/an)

Type de coût	Avant IPMEA (DA/an)	Après IPMEA (DA/an)	Réduction (DA/an)	Variation (%)
Maintenance corrective	12 863 000 DA	3 941 000 DA	8 922 000 DA	69.4 %
Maintenance préventive	2 848 000 DA	6 602 000 DA	-3 754 000 DA	-131.8 %
Coût des arrêts de production	24 511 000 DA	5 735 000 DA	18 776 000 DA	76.6 %
Main-d'œuvre	4 776 000 DA	4 016 000 DA	760 000 DA	15.9 %
Pièces de rechange	10 097 000 DA	4 757 000 DA	5 340 000 DA	52.9 %
COÛT TOTAL	55 095 000 DA	25 051 000 DA	30 044 000 DA	54.5 %

Lecture : L'application de l'IPMEA génère une économie globale estimée à 30 044 000 DA par an, soit 54.5 % de réduction du coût total. La maintenance corrective enregistre la baisse la plus marquée (−69.4 %), compensée en partie par une hausse planifiée des coûts préventifs (+131.8 %). Les coûts d'arrêt de production, poste le plus impactant, sont réduits de −76.6 %.

4.6.5.2 Gains économiques par équipement

Le tableau 4.9 présente pour chaque équipement du parc machine le coût total annuel estimé avant et après IPMEA, le gain économique réalisé ainsi que le taux de réduction correspondant. Les équipements sont classés par ordre décroissant de criticité IPMEA.

Tableau 4-8: Gains économiques estimatifs par équipement après implémentation du modèle IPMEA

Équipement	Zone	IPMEA	Priorité	C. total avant (DA/an)	C. total après (DA/an)	Gain (DA/an)	Taux (%)
Machine ERFCA EF 480S	Transformation	0.947	**Très élevée**	4 070 000 DA	1 870 000 DA	2 200 000 DA	**54.1 %**
Pasteurisateur HTST	Transformation	0.873	**Très élevée**	3 660 000 DA	1 640 000 DA	2 020 000 DA	**55.2 %**
Homogénéisateur	Transformation	0.814	**Très élevée**	3 120 000 DA	1 420 000 DA	1 700 000 DA	**54.5 %**
Souffleuse KHS	Conditionnement	0.804	**Très élevée**	3 340 000 DA	1 515 000 DA	1 825 000 DA	**54.6 %**
Évaporateur	Transformation	0.800	**Très élevée**	3 010 000 DA	1 350 000 DA	1 660 000 DA	**55.1 %**
Ga Procomac	Transformation	0.779	**Très élevée**	3 180 000 DA	1 425 000 DA	1 755 000 DA	**55.2 %**

Équipement	Zone	IPMEA	Priorité	C. total avant (DA/an)	C. total après (DA/an)	Gain (DA/an)	Taux (%)
Triblender (mélangeur de poudre)	Transformation	0.765	**Très élevée**	2 680 000 DA	1 215 000 DA	1 465 000 DA	**54.7 %**
Prepac	Transfert	0.761	**Très élevée**	2 490 000 DA	1 120 000 DA	1 370 000 DA	**55.0 %**
Chaudière	Thermique	0.755	**Très élevée**	2 330 000 DA	1 055 000 DA	1 275 000 DA	**54.7 %**
Machine d'inspection de forme	Transformation	0.753	**Très élevée**	2 400 000 DA	1 080 000 DA	1 320 000 DA	**55.0 %**
Cuves de préparation et maturation	Transformation	0.687	**Élevée**	1 620 000 DA	735 000 DA	885 000 DA	**54.6 %**
Compresseur 40 bar	Utilitaire	0.673	**Élevée**	1 545 000 DA	700 000 DA	845 000 DA	**54.7 %**
Vannes pneumatiques	Transformation	0.665	**Élevée**	955 000 DA	438 000 DA	517 000 DA	**54.1 %**
Débitmètres	Transformation	0.659	**Élevée**	908 000 DA	416 000 DA	492 000 DA	**54.2 %**
Machine d'osmose inverse	Utilitaire	0.644	**Élevée**	1 455 000 DA	661 000 DA	794 000 DA	**54.6 %**

Équipement	Zone	IPMEA	Priorité	C. total avant (DA/an)	C. total après (DA/an)	Gain (DA/an)	Taux (%)
Palettiseur	Conditionnement	0.638	**Élevée**	1 330 000 DA	605 000 DA	725 000 DA	**54.5 %**
Traitement des eaux	Utilitaire	0.618	**Élevée**	1 247 000 DA	568 000 DA	679 000 DA	**54.5 %**
Vérins	Transformation	0.611	**Élevée**	863 000 DA	396 000 DA	467 000 DA	**54.1 %**
Capteurs de proximité	Transformation	0.585	**Élevée**	648 000 DA	298 000 DA	350 000 DA	**54.0 %**
Agitateurs	Transformation	0.577	**Élevée**	999 000 DA	459 000 DA	540 000 DA	**54.1 %**
Salle de froidissement	Utilitaire	0.569	**Élevée**	1 118 000 DA	511 000 DA	607 000 DA	**54.3 %**

Capteurs inductifs	Transformation	0.571	**Élevée**	626 000 DA	289 000 DA	337 000 DA	**53.8 %**
Onduleurs	Utilitaire	0.523	**Élevée**	841 000 DA	384 000 DA	457 000 DA	**54.3 %**
Compresseur 7 bar	Utilitaire	0.532	**Élevée**	1 040 000 DA	476 000 DA	564 000 DA	**54.2 %**
Pompes centrifuges	Transformation	0.528	**Élevée**	800 000 DA	367 000 DA	433 000 DA	**54.1 %**
Dégazeur	Utilitaire	0.526	**Élevée**	692 000 DA	319 000 DA	373 000 DA	**53.9 %**
Fardeleuse	Transfert	0.681	**Élevée**	1 492 000 DA	679 000 DA	813 000 DA	**54.5 %**
Échangeur / refroidisseur	Transformation	0.687	**Élevée**	1 579 000 DA	723 000 DA	856 000 DA	**54.2 %**
Adoucisseur d'eau	Utilitaire	0.466	**Faible**	518 000 DA	239 000 DA	279 000 DA	**53.9 %**
Convoyeurs	Transfert	0.474	**Faible**	561 000 DA	258 000 DA	303 000 DA	**54.0 %**
Pompes (transfert)	Transformation	0.464	**Faible**	540 000 DA	247 000 DA	293 000 DA	**54.3 %**
CTA (central traitement d'air)	Utilitaire	0.499	**Faible**	734 000 DA	336 000 DA	398 000 DA	**54.2 %**

Adoucisseur interne	Interne	0.413	**Faible**	409 000 DA	187 000 DA	222 000 DA	**54.3 %**
Groupe électrogène	Support	0.462	**Faible**	691 000 DA	317 000 DA	374 000 DA	**54.1 %**
Banderoleuse (filmage palette)	Utilitaire	0.442	**Faible**	475 000 DA	218 000 DA	257 000 DA	**54.1 %**
Lave-bottes automatique	Utilitaire	0.346	**Faible**	368 000 DA	169 000 DA	199 000 DA	**54.1 %**
Ventilateur d'extraction	Support	0.317	**Faible**	325 000 DA	150 000 DA	175 000 DA	**53.8 %**
Transpalette manuel	Support	0.239	**Très faible**	130 000 DA	65 000 DA	65 000 DA	**50.0 %**
Convoyeur gravitaire	Utilitaire	0.243	**Très faible**	111 000 DA	54 000 DA	57 000 DA	**51.4 %**
Table conditionnement inox	Utilitaire	0.243	**Très faible**	93 000 DA	46 000 DA	47 000 DA	**50.5 %**
Pompe transfert eau nettoyage	Support	0.243	**Très faible**	102 000 DA	51 000 DA	51 000 DA	**50.0 %**
TOTAL GÉNÉRAL				**55 095 000 DA**	**25 051 000 DA**	**30 044 000 DA**	**54.5 %**

Ce tableau confirme que les économies les plus importantes sont réalisées sur les équipements à criticité très élevée (machine ERFCA EF 480S, pasteurisateur HTST, homogénéisateur, souffleuse KHS), ce qui valide la logique de priorisation défendue par le modèle IPMEA.

4.6.5.3 Décomposition détaillée des coûts — Équipements à criticité très élevée

Le tableau 4.10 détaille, pour les dix équipements classés en priorité très élevée (IPMEA ≥ 0,75), la décomposition des coûts par composante (corrective, préventive, arrêts, main-d'œuvre, pièces) avant et après IPMEA. Ces équipements concentrent à eux seuls les enjeux économiques les plus importants.

Tableau 4-9: Décomposition détaillée des coûts par composante pour les équipements à criticité très élevée (valeurs estimatives, DA/an)

Équipement	AVANT IPMEA (DA/an)					APRÈS IPMEA (DA/an)					Gain %
	Corrective	Préventive	Arrêts	M.O.	Pièces	Corrective	Préventive	Arrêts	M.O.	Pièces	
Machine ERFCA EF 480S	980 000	220 000	1 800 000	320 000	750 000	310 000	480 000	420 000	280 000	380 000	**54.1 %**
Pasteurisateur HTST	860 000	180 000	1 650 000	290 000	680 000	260 000	420 000	390 000	250 000	320 000	**55.2 %**
Homogénéisateur	720 000	160 000	1 400 000	260 000	580 000	220 000	380 000	330 000	220 000	270 000	**54.5 %**
Souffleuse KHS	780 000	170 000	1 500 000	270 000	620 000	240 000	400 000	350 000	230 000	295 000	**54.6 %**
Évaporateur	700 000	150 000	1 350 000	250 000	560 000	210 000	360 000	315 000	210 000	255 000	**55.1 %**
Ga Procomac	740 000	155 000	1 420 000	265 000	600 000	225 000	370 000	330 000	225 000	275 000	**55.2 %**
Triblender (mélangeur de poudre)	620 000	140 000	1 200 000	230 000	490 000	190 000	320 000	280 000	195 000	230 000	**54.7 %**
Prepac	580 000	130 000	1 120 000	210 000	450 000	175 000	295 000	260 000	180 000	210 000	**55.0 %**

Équipement	AVANT IPMEA (DA/an)					APRÈS IPMEA (DA/an)					Gain %
	Corrective	Préventive	Arrêts	M.O.	Pièces	Corrective	Préventive	Arrêts	M.O.	Pièces	
Chaudière	540 000	120 000	1 050 000	200 000	420 000	165 000	280 000	245 000	170 000	195 000	**54.7 %**
Machine d'inspection de forme	560 000	125 000	1 080 000	205 000	430 000	170 000	285 000	250 000	175 000	200 000	**55.0 %**

4.7 Analyse et interprétation des résultats IPMEA

L'analyse des résultats du modèle IPMEA met en évidence une concentration notable des équipements dans les classes de criticité élevée et très élevée, traduisant l'importance stratégique de plusieurs équipements dans le système de production agroalimentaire étudié. Les équipements les plus critiques appartiennent principalement aux phases de transformation et de conditionnement, confirmant leur rôle déterminant dans la continuité de production et la qualité sanitaire. Par ailleurs, l'influence dominante de certains critères, tels que le risque de défaillance, la fréquence des pannes et la durée des arrêts, souligne la pertinence de l'approche multicritère adoptée. Ces résultats permettent ainsi de prioriser efficacement les actions de maintenance et d'orienter les ressources vers les équipements à plus fort impact opérationnel.

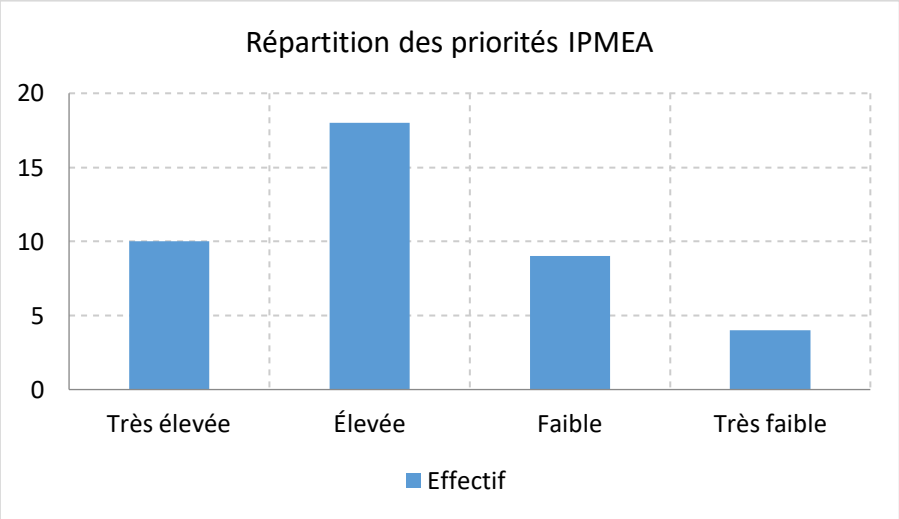

Figure 4-3:Répartition des équipements selon le niveau de priorité IPMEA

La figure 4.3 illustre la distribution des équipements en fonction des classes de criticité définies par l'indice IPMEA. On observe une concentration significative des équipements dans les catégories **élevée** et **très élevée**, traduisant un niveau global de criticité important au sein du système de production étudié.

Cette répartition s'explique par la nature continue et fortement interconnectée du procédé agroalimentaire, où une défaillance localisée peut entraîner des perturbations à l'échelle de toute la ligne de production. Elle met également en évidence la nécessité d'une stratégie de maintenance proactive, basée sur la priorisation des équipements critiques.

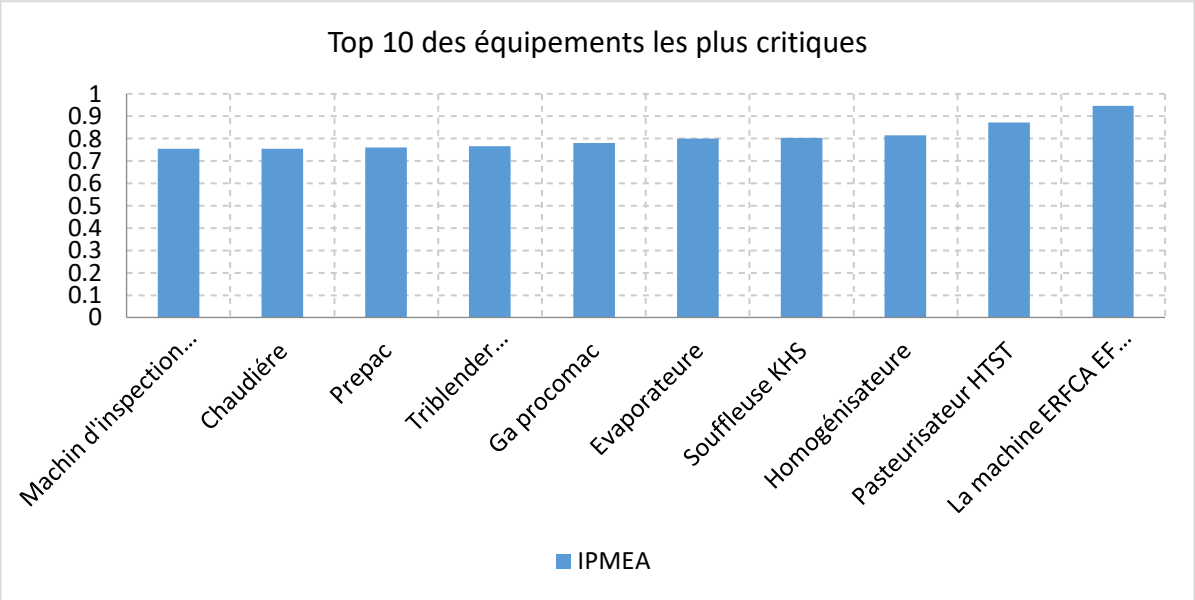

Figure 4-4: Classement des équipements les plus critiques (Top 10 IPMEA)

La figure 4.4 présente les dix équipements ayant les valeurs IPMEA les plus élevées. Il apparaît que ces équipements appartiennent principalement aux catégories suivantes :

- Équipements de transformation (traitement thermique, pasteurisation),
- Équipements de conditionnement,
- Systèmes utilitaires critiques (froid industriel, air comprimé).

Ces équipements se caractérisent par :

- Un rôle central dans le procédé,
- Une forte fréquence d'utilisation,
- Un impact direct sur la qualité et la sécurité du produit.

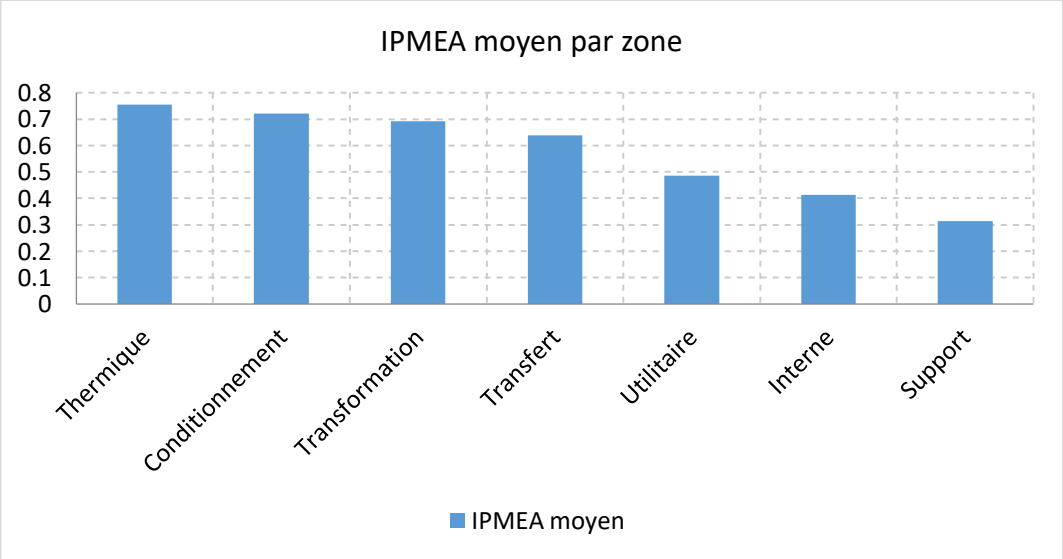

Figure 4-5: IPMEA moyen par zone de production

Dans la figure 4.3 met en évidence la variation du niveau de criticité en fonction des différentes zones ou ateliers de production. Les résultats montrent que les zones de **transformation** et de **conditionnement** présentent les valeurs IPMEA moyennes les plus élevées.

Ces zones concentrent des équipements à forte valeur ajoutée, soumis à des contraintes techniques et sanitaires strictes. À l'inverse, les zones auxiliaires ou de support présentent des niveaux de criticité plus faibles, justifiant une fréquence d'intervention moins élevée.

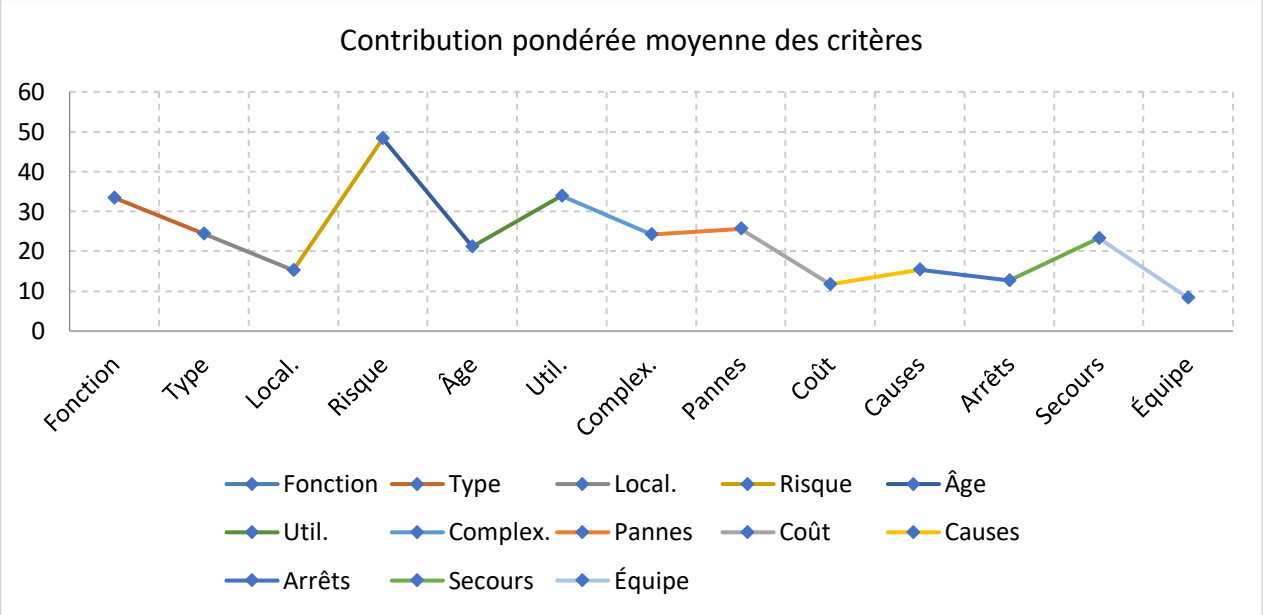

Figure 4-6: Contribution des critères à l'indice IPMEA

Cette figure illustre la contribution relative des différents paramètres du modèle IPMEA à la criticité globale des équipements. Les résultats montrent que certains critères ont une influence prépondérante, notamment :

- Le risque de conséquence d'une défaillance,
- La fréquence des pannes,
- La fonction de l'équipement dans le procédé,
- La durée des temps d'arrêt.

Ces paramètres traduisent l'importance des dimensions **sécurité, fiabilité et impact opérationnel** dans l'évaluation de la criticité. Cette observation confirme la pertinence de l'approche multicritère adoptée dans le modèle IPMEA.

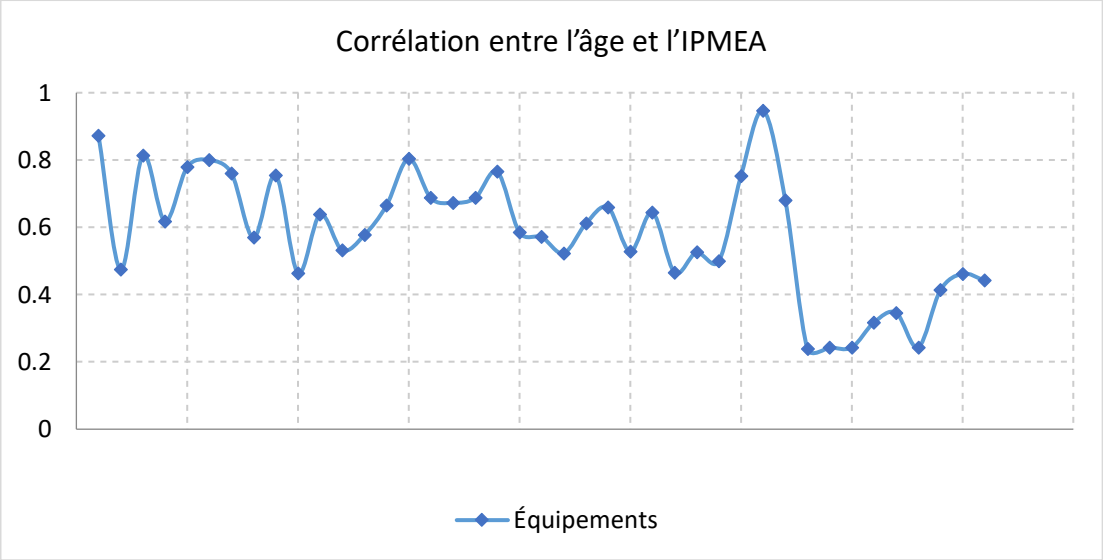

Figure 4-7: Corrélation entre l'âge des équipements et l'indice IPMEA

La figure 4.5 présente une analyse de la relation entre l'âge des équipements et leur niveau de criticité. Les résultats montrent une tendance globale à l'augmentation de l'indice IPMEA avec l'âge, bien que cette relation ne soit pas strictement linéaire.

Certains équipements récents présentent également des niveaux de criticité élevés, en raison de leur rôle stratégique dans le procédé ou de leur forte sollicitation. Cela confirme que la criticité ne dépend pas uniquement de l'âge, mais résulte d'une combinaison de facteurs techniques, opérationnels et organisationnels.

4.8 Discussion

L'application du modèle IPMEA à la Laiterie TRÈFLE démontre qu'une stratégie de maintenance basée sur la criticité est à la fois techniquement pertinente et économiquement avantageuse. Contrairement à une approche corrective réactive, elle permet d'améliorer la disponibilité des équipements, de renforcer la sécurité alimentaire en réduisant les risques de contamination liés aux pannes en zone critique, de réduire les pertes de production et d'optimiser l'allocation des ressources humaines et matérielles de maintenance.

Il convient toutefois de souligner que la précision de cette évaluation dépend de la qualité des données collectées et de la rigueur dans l'estimation des coûts. La mise en place d'un système de gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO) permettrait, à terme, d'affiner ces estimations à partir de données réelles et de suivre l'évolution des indicateurs économiques dans le temps.

Par ailleurs, le modèle IPMEA, développé spécifiquement pour le secteur agroalimentaire, intègre des critères propres à ce secteur (sécurité alimentaire, conformité hygiénique, localisation en zone critique) qui ne sont pas pris en compte dans les modèles génériques de criticité. Cela renforce la pertinence de l'approche dans le contexte de la Laiterie TRÈFLE

Conclusion générale

Le modèle IPMEA développé dans ce travail a permis de dépasser une approche classique de la maintenance basée uniquement sur le temps. En intégrant treize paramètres liés à *la fonction de l'équipement, à sa position dans le procédé, à son âge, à sa fréquence d'utilisation, à la gravité des défaillances, à la durée des arrêts, au coût des interventions et à la disponibilité des moyens de secours*, le modèle offre une vision plus complète et plus réaliste de la criticité des équipements. Cette démarche multicritère a l'avantage de transformer des données parfois dispersées ou qualitatives en un indicateur synthétique, lisible et exploitable pour orienter les décisions de maintenance.

L'application du modèle aux équipements de **TRÈFLE** a montré que la criticité n'est pas répartie de manière homogène dans l'usine. Certains équipements, notamment ceux liés à la transformation, au conditionnement et aux utilités essentielles, présentent un niveau de criticité élevé ou très élevé. Cela confirme que toutes les machines ne jouent pas le même rôle dans la stabilité du processus de production. Une panne sur un équipement stratégique peut provoquer un arrêt de ligne, une perte de matière première, une rupture de la chaîne de froid ou encore un risque de non-conformité sanitaire. Les résultats obtenus ont donc permis de mettre en évidence les équipements sur lesquels l'effort de maintenance doit être concentré en priorité.

L'étude a également montré que certains critères avaient un poids particulièrement fort dans l'évaluation globale, notamment le risque de conséquence d'une défaillance, la fréquence des pannes et la durée des arrêts. Cela confirme que, dans l'industrie agroalimentaire, la criticité ne se limite pas à la seule ancienneté d'un équipement. Elle dépend aussi de son impact réel sur la sécurité alimentaire, sur la continuité du procédé et sur la performance économique de l'entreprise.

Sur le plan technico-économique, les résultats obtenus sont très encourageants. L'évaluation réalisée montre que l'application du modèle IPMEA permet de réduire significativement les coûts globaux de maintenance, avec une économie annuelle estimée à environ *30 044 000 DA* et une diminution globale de l'ordre de 54,5 %. Au-delà de l'aspect financier, ces résultats traduisent aussi une amélioration de la disponibilité des équipements, une meilleure organisation des interventions et une réduction des arrêts non planifiés. En d'autres termes, la maintenance préventive ne doit pas être perçue comme une charge supplémentaire, mais comme un investissement stratégique qui permet de sécuriser la production et de renforcer la compétitivité de l'entreprise.

Ce travail ouvre également *des perspectives intéressantes*. Il pourrait être enrichi par l'intégration d'outils numériques de suivi, de systèmes de GMAO plus avancés ou encore d'approches de maintenance prédictive basées sur les données réelles d'exploitation. Dans cette perspective, l'IPMEA ne serait pas seulement un outil de classification des équipements, mais un premier pas vers une maintenance plus intelligente, plus anticipative et mieux alignée avec les exigences de l'industrie agroalimentaire moderne.

LISTE DES REFERANCE

[1] Coro, A., Abasolo, M., Aguirrebeitia, J., and López de Lacalle, L. (2019). Inspection scheduling based on reliability updating of gas turbine welded structures. Advances in Mechanical Engineering, 11(1):1687814018819285.

[2] Squeo, M., Frigerio, N., and Matta, A. (2019). Multiple sleeping states for energy saving in cnc machining centers. Procedia CIRP, 80:144–149.

[3] Khatravath, S., Verma, N. K., & Salour, A. (2015). Cost benefit analysis for maintenance of rotating machines. Paper presented at the 2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM).

[4] Heng, J. (2011). Pratique de la maintenance préventive-3e éd : Dunod

[5] Rachid Noureddine,"Implémentation de la maintenance prédictive dans les systèmes de production ", University of Oran 2 Mohamed Ben Ahmed 2008.

[6] NF X060-OlO-AFNOR 1991

[7] Pagetti.C., sureté de fonctionnement, Enseeiht 2012.

[8] Chapouille.P., Fiabilité. Maintenabilité. Techniques de l'ingénieur, 6 : T4300-T4305,

[9] Belhadj D. A, Maintenance et sureté de fonctionnement, polycopié, Université Ilassiba

[10] Monchy.F, Maintenance méthodes et organisations, Dunod

[11]. Houssein Jaber, Conception architecturale haut débit et sûre de fonctionnement pour les codes correcteurs d'erreurs, Thèse de Doctorat, l'Université Paul Verlaine – Metz, 2009.

[12]. Monchy, F. Maintenance Méthodes et Organisations (2e édition). Paris : Dunod (2003)

[13] HERGON. E, CRESPEAU. H, ROUGER. Ph, Modes de défaillance du processus transfusionnel. Intérêt de l'analyse prévisionnelle de sureté de fonctionnement, Paris : Institut National de la Transfusion Sanguine.

[14] M. AYAD et T. KEBBAB, « Mémoire : AMDEC – Etude de cas : Extracteur de fumée de l'Entreprise Nationale de la Pétrochimie ENIP, » 2008/2009.

[15] DEBRAY.B, CHAUMETTE.S, DESCOURIERE.S, TROMMETER.V, Méthode d'analyse des risques générés par une installation industrielle.

[16] T. Derradj, « Analyse des modes de défaillances de la pompe centrifuge 107G, » université 20 Aout 1955 Skikda, 2009.

[17] A. B. DJAAFER, « Réalisation d'un plan de maintenance préventive systématique pour l'amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un système électromécanique, » 2012 / 2013, 2012 / 2013.

[18] nasa-rcmguide.pdf

[19] Nowlan, F. Stanley, and Howard F. Heap. Reliability-Centered Maintenance. Department of Defense, Washington, D.C. 1978. Report Number AD-A066579.

[20] D. Richet, M. Gabriel, La Maintenance Basée sur la Fiabilité, Edition Masson 1996

[21] Marc Babic. Lean pour les managers. AFNOR, 2018

[22] K. Kulakowski, "Understanding the Analytic Hierarchy Process," Underst. Anal. Hierarchy Process, no. 2012, 2020, doi : 10.1201/b21817.

[23] [Jeong-hwa AN. 2011] « Le choix d'un système de transport durable : analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface. » Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est.

[24] [RAKOTOARIVELO Jean Baptiste.2015] « ANALYSE COMPARATIVE DE METHODES MULTICRITERES D'AIDE A LA DECISION POUR LE SECTEUR FINANCIER. », Rapport de recherche, UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE.

[25] Mu. E Pereyra-rojas, M., "An Introduction to the analytic hieararchy processe using super decision," Practical decision making, 2017.

[26] Roy B., (1977), Critique et dépassement de la problématique d'optimisation. In, Cahiers Sema, 1, p. 35-42.