N° d'ordre 17 /2021

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Melle : SALIMA HAMMADI

Discipline : Génie Industriel

Spécialité : Génie Industriel

Sujet de la thèse : **Contribution au management de la logistique maintenance : modèles et outils d'implantation.**

Formation Doctorale : Sciences de l'ingénieur Sciences Physiques, Mathématiques et Informatique.

Thèse présentée et soutenue le vendredi 12 février 2021 à 10h au centre de conférences devant le jury composé de :

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Mohammed EL HAMMOUMI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Abdelhamid EL AMRI	PES	Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et Mécanique de Casablanca	Rapporteur
Abdelali EN-NADI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Rapporteur
Abdeljabar KHELLOUKI	PH	Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Meknès	Rapporteur
Hamid ZAGHAR	PH	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Examinateur
Nabil MOUJIBI	PH	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Examinateur
Abderrahim CHAMAT	PH	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examinateur
Brahim HERROU	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Techniques Industrielles.

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès.

Remerciements

Le chemin de la recherche scientifique est parsemé de fruits d'apprentissage et de développement des compétences. C'est un voyage dans les univers de la science dépassant les frontières et enrichissant les expériences pour être couronné par des résultats scientifiques reflétant la forte collaboration des efforts de recherche, d'orientation et de soutien. Certes, la forme plurielle de ses efforts renvoie au pluriel des personnes qui en sont derrière.

Après avoir vécu cette expérience de recherche impressionnante au Centre d'Etude Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénieur au sein du laboratoire Techniques Industrielles et avant de présenter sa récolte, je juge prioritaire d'exprimer ma reconnaissance envers les personnes qui m'ont aidé à réussir ce projet de recherche.

Pour son suivi, soutien et orientation ainsi que pour sa confiance et encouragement, je remercie Mr. Herrou Brahim, mon encadrant et directeur de thèse. Je tiens à remercier également le directeur de notre laboratoire et directeur du pôle de recherche TICSM, Monsieur El Hammoumi Mohammed pour son soutien et communication de toute opportunité de formation et de recherche aux doctorants et membres du laboratoire. Comme je remercie Mr El Mestafa El Hadrami, vice doyen chargé de la recherche scientifique et de la coopération pour ces efforts reconnus envers la communauté de recherche du CED, sans oublier de remercier Monsieur Mustapha Ijjaali, doyen de la Faculté des Sciences et Techniques et Monsieur Taoufiq Achibat, vice doyen chargé des affaires pédagogiques et estudiantines pour leur engagement, soutien et disponibilité afin d'encourager et promouvoir la recherche scientifique dans le cadre du CED.

Aboutissant à la fin de ce travail de thèse, je reste incapable de décrire mes sentiments de reconnaissance envers mes parents pour leur soutien continu et leur engagement total pour réussir ce projet.

Je dois toute la reconnaissance envers vous chère mère pour toutes les années d'accompagnement et de soutien dès mes premiers pas dans le sentier de la science.

Envers vous cher père, je dois tout le respect témoignant votre motivant encouragement et soutien.

Finalement, je remercie tous mes professeurs ainsi que toute personne qui a aidé de près ou de loin à réaliser ce travail de thèse étant une occasion précieuse pour vivre la passion d'apprentissage et d'innovation.

À vous tous j'offre ces vers de reconnaissance :

Un effort ne serait fructueux

Que grâce aux esprits ingénieux

Sages d'orienteurs et industrieux

Auxquels j'adresse un salut respectueux

Partageant tous précieux

M'ont offert des gouttes d'or à l'orifice

Éveillant l'histoire du sacrifice

Cherchant à recueillir de la science tous les bénéfices

Généreux et affables

Disponibles et serviables

Étaient les formateurs remerciables

Décrivant toute recette au projet utile et profitable

À la conception éclairant le sentier

Et aux arts de l'ouvrage maitrisant le chantier

Dus jus savoureux sentant les délices de la science

Aux fruits de l'expérience

Investissant les grains de compétences

Les projets ainsi sont cultivés à l'horizon des espérances

Médaille d'honneur couronnant les persévérances

Remerciant toutes les équipes

À la faculté méritant de belles tulipes



Vers composés par : ***Salima Hammadi***

Résumé

La maintenance industrielle est une discipline de large étendue faisant appel à un cadre plus générique permettant de gérer toutes les ressources. Dans cette optique, nous traitons la problématique du management de la logistique maintenance dans un cadre durable pour une interaction plus flexible entre l'opérateur et son outil de production permettant de résoudre efficacement les problèmes liés aux équipements tout en activant le potentiel du facteur humain.

Le cadre de la logistique maintenance a été étudié par rapport aux aspects organisationnels à travers l'analyse des différentes références de la revue de littérature identifiant ainsi le besoin d'une nouvelle définition considérons le système logistique maintenance un nouveau cadre organisationnel générique et durable au sein duquel les pratiques managériales sont implantées ciblant l'amélioration de la disponibilité du sous-système physique. Après avoir discuté les aspects managériaux résumant les différents modèles de management de la maintenance identifiés dans la littérature, on a mené une étude empirique basée sur l'analyse des résultats des questionnaires adressés aux systèmes de productions marocains afin d'identifier les problèmes liés au cadre managérial de la logistique maintenance. Cette analyse statistique réalisée sur le logiciel SPSS (Statistical Package for Social Sciences) a dévoilé un niveau insuffisant d'implication de l'opérateur et un environnement logistique requérant une meilleure organisation, ce qui a été confirmé par les résultats de deux études de cas réalisées au sein de deux systèmes de production marocain et canadien exprimant le besoin d'un nouveau modèle de la logistique maintenance remédiant à ces problèmes.

Dans l'objectif de répondre à ce besoin, nous proposons un nouveau modèle générique et durable de la logistique maintenance intégrant la culture lean et le retour d'expérience pour une meilleure organisation de l'environnement logistique et surtout pour une implication efficace du facteur humain via le modèle Lean/REX. La concrétisation de cette vision nécessite des outils pratiques et adaptés afin de garantir une implantation réussie des modèles proposés au milieu industriel. Ainsi, nous proposons le déploiement de l'outil 5SMS et la plateforme Smart TIPM 4.0 étant une plateforme de collaboration à distance dans le contexte du Covid-19 et de la perspective de l'industrie 4.0, comme nous proposons un ensemble de nouveaux indicateurs pour l'évaluation des améliorations atteintes dans le cadre du système logistique maintenance.

Sommaire

Remerciements **1**
Résumé **3**
Sommaire **4**
Liste des Tableaux **8**
Liste des figures **9**
Liste des acronymes **11**
Introduction générale **13**
Chapitre 1. Maintenance des systèmes de production **15**
I. Introduction **15**
II. Les systèmes de production industriels **15**
1. Définitions et objectifs 15
1.1. Définition 15
1.2. Objectifs d'un système de production 16
1.3. Sous-systèmes d'un système de production 16
2. Les modèles des systèmes de production 17
2.1. Taylorisme 17
2.2. Fordisme 19
2.3. Critiques du taylorisme et fordisme 20
2.4. Le Toyotisme 20
2.5. Systèmes de production et enjeux de flexibilité 21
3. Synthèse 23
III. Rôle de la maintenance dans un système de production industriel **24**
1. Formes Organisationnelles de la maintenance 24
2. Définitions et Typologie de la maintenance 27
2.1. Définitions 27
2.2. Typologie de la maintenance 27
IV. Conclusion **29**
Chapitre 2. Définition du cadre logistique de la maintenance **30**
I. Introduction **30**
II. Cadre logistique de la maintenance **30**
1. Evolution des travaux de recherches dans la thématique de logistique de maintenance 30
1.1. Tendance chronologique 31
1.2. Classification des résultats selon le champ du sujet 31

1.3. Tendance chronologique des publications dans le champ de l'ingénierie 32
1.4. Tendance mondiale des publications dans le champ de l'ingénierie 32
1.5. Classement des documents selon le type 33
2. Aspects logistiques en maintenance 34
3. Synthèse 40
4. Orientations et objectifs de recherche 41
III. Logistique maintenance : définition du cadre organisationnel 42
1. La logistique 42
2. Soutien logistique 43
3. Soutien logistique intégré (SLI) 44
4. Position de la logistique maintenance 44
5. Enjeux de durabilité 45
6. Logistique maintenance : une nouvelle définition dans le cadre de l'approche systémique 46
7. Ressources de la logistique maintenance 48
8. Synthèse 50
IV. Logistique maintenance : définition du cadre managérial 50
1. Management de la maintenance 50
2. Stratégies /politiques de Maintenance 52
2.1. La MBF 52
2.2. La TPM 53
3. Synthèse 56
4. Conclusion 56
Chapitre 3. Le management de la maintenance : étude empirique 58
I. Cadre de l'étude 58
II. Analyse des résultats des questionnaires 58
1. Niveau de communication entre le service maintenance et les autres services 59
2. Niveau d'implication de l'opérateur de production dans la résolution de problèmes liées aux équipements 60
2.1. Analyse de la fiabilité de l'échelle 61
2.2. Analyse des réponses 63
2.3. Synthèse 66
3. Organisation de l'environnement logistique de travail et son influence. 66
3.1. Analyse de fiabilité de l'échelle 66
3.2. Analyse des réponses 67
4. L'impact de l'implantation du Lean en logistique maintenance 69
4.1. Analyse de fiabilité de l'échelle 69
4.2. Classement des éléments 71

4.3. Synthèse 72
5. Positionnement du retour d'expérience par rapport au système d'information et de communication de la maintenance. 72
5.1. Collecte du feedback de l'opérateur de production 72
5.2. Importance de l'intégration du retour d'expérience de l'opérateur de production 73
5.3. Motivation pour l'implantation d'une plateforme de communication et coordination avec l'opérateur de production. 75
5.4. Synthèse 77
III. Conclusion 77
Chapitre 4. L'intégration du Lean en management de la logistique maintenance : un nouveau cadre durable 79
I. Introduction 79
II. La philosophie Lean 79
III. Le défi Lean/durabilité 82
IV. Le défi Lean / durabilité en maintenance : Deux études de cas des industries Marocaines et Canadiennes. 89
V. Synthèse 92
VI. Conclusion 93
Chapitre 5. La logistique maintenance : un nouveau modèle durable 94
I. Introduction 94
II. La logistique maintenance : un cadre durable pour lutter contre les gaspillages 94
1. Vers un modèle générique durable 94
2. Gestion de l'environnement logistique de maintenance 97
2.1. Importance du déploiement des 5S 97
2.2. 5SMS : Un outil adapté pour l'organisation des stocks de maintenance. 98
3. Gestion des connaissances et des expériences : vers un modèle Lean/REX 102
3.1. Gestion des connaissances 102
3.2. Connaissance de l'entreprise 104
3.3. Gestion des expériences 105
3.4. Retour d'expérience et apprentissage. 105
4. La logistique maintenance : vers un modèle Lean/REX 106
III. Conclusion 110
Chapitre 6. Développement de la plateforme Smart TIPM 4.0 pour l'implantation du modèle Lean/REX. 111
I. Introduction au contexte de développement de la plateforme 111
1. Introduction 111
2. Cadre de l'industrie 4.0 111
3. Contexte de la pandémie COVID-19 112

II. Introduction à la plateforme Smart TIPM 4.0 112
1. Concept de la plateforme 112
2. Appellation et positionnement par rapport au système logistique maintenance 113
III. Modélisation UML de la plateforme 113
1. Introduction 113
2. Diagrammes de cas d'utilisation 114
2.1. Diagramme de cas d'utilisation "Administrateurs" 114
2.2. Diagramme de cas d'utilisation "Opérateurs" 115
2.3. Diagramme de cas d'utilisation "Responsables" 116
3. Diagramme de Classe de la plateforme Smart TIPM 4.0 118
4. Conception des indicateurs TIPM 119
4.1. Conception des indicateurs DIF 119
4.2. Calcul du TRS 121
5. Développement des interfaces de la plateforme Smart TIPM 4.0 121
5.1. Interface de connexion 121
5.2. Menu de l'administrateur 122
5.3. Interfaces du responsable poste 123
5.4. Interfaces du responsable maintenance 126
5.5. Menu de l'opérateur de maintenance 130
5.6. Menu du responsable production 130
IV. Conclusion 131
***Conclusion générale* 132**
***Références* 134**
***Productions Scientifiques* 143**
***Annexes* 145**

Liste des Tableaux

Tableau 1. Principaux points faibles et critiques du Taylorisme et Fordisme et leurs conséquences. 20
Tableau 2. Tableau comparatif entre les différentes formes organisationnelles de la maintenance. 25
Tableau 3. Propriétés d'un bien [NF 13306]. 29
Tableau 4. Classement des documents selon les aspects logistiques traités en maintenance. 35
Tableau 5. Echelle d'évaluation du niveau d'implication de l'opérateur de production dans la résolution de problèmes liés aux équipements. 61
Tableau 6. Statistiques de fiabilité 61
Tableau 7. Statistiques d'éléments 62
Tableau 8. Matrice de corrélation inter-éléments. 62
Tableau 9. Statistique totale des éléments. 63
Tableau 10. Statistiques d'échelle 63
Tableau 11. Statistique de fiabilité de l'échelle relative à l'organisation de l'environnement logistique de travail. 67
Tableau 12. Statistique de fiabilité de l'échelle relative à l'impact du lean en logistique maintenance. 69
Tableau 13. Statistiques des éléments de l'échelle relative à l'impact du lean en logistique maintenance. 70
Tableau 14. Matrice de corrélation inter-éléments mesurant l'impact du lean. 70
Tableau 15. Statistique totale des éléments mesurant l'impact du lean. 71
Tableau 16. Statistiques de l'échelle mesurant l'impact du lean. 71
Tableau 17. Classement des champs bénéficiant de l'implantation du lean. 72
Tableau 18. Test de Kruskal Wallis pour l'importance de l'intégration du retour d'expérience par rapport à la taille de l'entreprise. 75
Tableau 19. Test de Kruskal Wallis pour l'importance de l'intégration du retour d'expérience par rapport au secteur d'activité. 75
Tableau 20. Test de Kruskal Wallis pour l'implantation d'une plateforme de communication et coordination avec l'opérateur de production par rapport à la taille d'entreprise. 76
Tableau 21. Test de Kruskal Wallis pour l'implantation d'une plateforme de communication et coordination avec l'opérateur de production par rapport au secteur d'activité. 77
Tableau 22. Classification des gaspillages selon le contexte. 81
Tableau 23. Aspects lean / durabilité en manufacturing [89]. 84
Tableau 24. Aspects Lean / durabilité en maintenance [89]. 87
Tableau 25. L'outil adapté **5SMS** [98]. 99
Tableau 26. Indicateurs d'interaction. 120

Liste des figures

Figure 1. Schéma d'un système de production industriel. 15
Figure 2. Objectifs d'un système de production industriel. 16
Figure 3. Schéma du système de production vue par l'approche systémique. 17
Figure 4. Interaction Homme-machine dans un système de production. 23
Figure 5. Les différents types de maintenance. 28
Figure 6. Tendance chronologique des documents publiés dans Scopus entre 1991 et 2017 [source : Scopus]. 31
Figure 7. Classement des documents publiés selon le champ du sujet [source : Scopus]. 31
Figure 8. Tendance chronologique des documents publiés dans Scopus dans le champ ingénierie entre 1991 et 2017[source : Scopus]. 32
Figure 9. Classement mondial des documents publiés dans le champ de l'ingénierie entre 1991 et 2017[source : Scopus]. 33
Figure 10. Classement des documents selon leur type [source : Scopus]. 33
Figure 11. Processus de traitement de la problématique de recherche. 40
Figure 12. Les fonctions et ressources du soutien logistique [27]. 43
Figure 13. Position centrale de la logistique maintenance dans un système de production industriel. 44
Figure 14. Management durable des ressources. 46
Figure 15. Le système logistique maintenance [41]. 48
Figure 16. Position générale de la logistique maintenance [41]. 48
Figure 17. Processus d'implantation de la MBF. 53
Figure 18. L'approche 8 piliers pour l'implantation de la TPM (proposé par JIPM) [52]. 55
Figure 19. Répartition de l'échantillon selon la taille d'entreprise. 58
Figure 20. Répartition de l'échantillon selon le secteur d'activité. 59
Figure 21. Niveau de communication entre le département/service maintenance et les autres services. 60
Figure 22. Fréquence de déclaration des défaillances par l'opérateur de production. 64
Figure 23. Fréquence de proposition de solutions aux problèmes liés aux équipements par l'opérateur de production. 65
Figure 24. Fréquence de participation de l'opérateur de production à la mise en place des propositions d'amélioration et plans de maintenance. 66
Figure 25. Niveau d'organisation de l'outillage et stocks de maintenance. 67
Figure 26. Niveau d'influence de l'organisation de l'outillage et stock de maintenance sur le déroulement des interventions. 68
Figure 27. Fréquence de collecte du feedback des opérateurs de production. 73
Figure 28. Importance de l'intégration du retour d'expérience des opérateurs de production dans la résolution des problèmes liés aux équipements. 74
Figure 29. Motivation pour l'implantation d'une plateforme de communication et coordination avec l'opérateur de production. 76
Figure 30. Les 7 types de gaspillages [15]. 80
Figure 31. Les principaux gaspillages en maintenance [78][81]. 82
Figure 32. Diagramme d'Ishikawa des principaux problèmes de maintenance identifiés affectant les performances du système de production dans deux systèmes de production différents au Maroc et au Canada. 90
Figure 33. Dimensions de la logistique maintenance dans un cadre durable [158]. 95
Figure 34. Gaspillages et leurs niveaux d'origine dans le système logistique maintenance. 95
Figure 35. Modèle générique durable de la logistique maintenance [98]. 97
Figure 36. Rangement des vis 6 pans creux en se basant sur les caractéristiques techniques. 100
Figure 37. Etat du stock avant et après le déploiement des 5SMS. 100
Figure 38. Cycle de gestion des connaissances selon Grundstein [100] 102

Figure 39. Processus d'activation des connaissances [101]. 103
Figure 40. Classification des types de connaissances [102][103]. 103
Figure 41. Le cycle d'apprentissage. 105
Figure 42. Modèle Lean/REX pour l'activation et l'exploitation du REX dynamique [89]. 108
Figure 43. Diagramme de cas d'utilisation Administrateurs. 115
Figure 44. Diagramme de cas d'utilisation "Opérateurs" 116
Figure 45. Diagramme de cas d'utilisation "Responsables". 117
Figure 46. Diagramme de classe de la plateforme Smart TIPM 4.0. 118
Figure 47. Extrait du code php et html de calcul et d'affichage de l'indicateur DIF. 121
Figure 48. Interface de connexion de la plateforme Smart TIPM 4.0 122
Figure 49. Menu administrateur (cas d'un Super Admin). 122
Figure 50. Menu Responsable poste (Equipment Manager). 123
Figure 51. Interface de déclaration de défaillance. 124
Figure 52. Interface évaluation des effets 125
Figure 53. Interface tableaux des effets déclarés 125
Figure 54. Interface de proposition de solution. 126
Figure 55. Interface des défaillances déclarées par le responsable poste. 126
Figure 56. Menu du Responsable maintenance. 127
Figure 57. Tableau de bord des indicateurs DIF. 128
Figure 58. Interface de gestion des défaillances déclarées. 129
Figure 59. Interface d'évaluation des Effets. 130
Figure 60. Menu de l'opérateur de maintenance. 130
Figure 61. Menu du responsable production. 131

Liste des acronymes

5

5SMS *: 5S for Maintenance Stores*

A

AMDEC : *Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité*
ARMDEC *: Analyse Rapide des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité*

C

CBM *: Condition Based Maintenance*
CC *: (Category/ characteristics) Catégorie/Caractéristiques*
CK *: Collective knowledge*
CM *: Corrective Maintenance*

D

D.D *: Développement Durable*
DIF *: Daily Interaction Feedback (Feedback de l'interaction quotidienne)*

E

Exec *:Taux d'exécution (Execution Rate)*

I

IBM *: International Business Machines Corporation*
Innov *: Taux d'innovation (Innovation Rate)*

J

JIPM *: Japan Institute of Plan Maintenance*
JMA *: Japan Management Association*

L

LDM *: Logistique Durable de Maintenance*
LM : *Logistique Maintenance*

M

MBF *: Maintenance Basée sur la Fiabilité*
MBR *: Maintenance Basée sur le Risque*
MICS : *Maintenance Information and Communication Subsystem*
Monitor *: Taux de contrôle (Monitoring Rate)*
MPS *: Maintenance Physical Subsystem*
MReact *: Mean Reactivity Rate (Taux moyen de réactivité)*
MSMS *: Maintenance Strategic Management Subsystem*

O

OST: *Organisation scientifique du travail*

P

Plan *: Planning Rate (Taux de Planification)*
PM *: Preventive Maintenance*
PURE *: (Pick up, Use and Return Effectively) Prendre, Utiliser, Retourner Efficacement.*

R

RE *: Responsable Equipement*
REX *: Retour d'expérience*

S

SL *: Soutien logistique*
SLI : *Soutien Logistique Intégré*
Smart TIPM 4.0 *: Smart Total Interactive Productive Maintenance 4.0*
SP *: Système de production*
SPSS *: Statistical Package for Social Sciences*

T

TMR (ou MST) *: (Mean Search Time) Temps Moyen de Recherche d'un élément*
TPM *: Total Productive Maintenance (Maintenance Productive Totale)*
TPS *: Toyota Production System*
TR *: Temps de Recherche d'un outil ou élément du stock*
TRS *: Taux de Rendement Synthétique.*
TRSI *: Taux de Rendement Synthétique Interactionnel.*

Introduction générale

De nos jours, la compétitivité industrielle et les contraintes de production révèlent des défis de plus en plus complexes pour les chaînes logistiques à l'échelle des systèmes logistiques internes et externes aux systèmes de production.

Dans le périmètre de la logistique interne, la disponibilité est un facteur clé de performance garantissant la pérennité des systèmes de production. Ce qui justifie la nécessité d'un nouveau contexte générique pour la définition de la logistique maintenance pour gérer l'ensemble des ressources de maintenance et leurs interactions entre autres l'interaction Homme-machine représentant l'interaction de l'opérateur avec son outil de production.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons au management de la logistique maintenance et son rôle pour la gestion de l'interaction homme-machine et l'amélioration de la disponibilité du système principal. Dans cette optique, Nous avons étudié la notion de la logistique maintenance dans les chapitres 1 et 2 à travers :

- L'identification du rôle de la maintenance et des aspects logistiques en maintenance dans la littérature, après avoir discuté l'évolution de l'environnement des systèmes de production.
- La définition du cadre organisationnel de la logistique maintenance afin de redéfinir et positionner la logistique maintenance par rapport aux notions connexes à la logistique et aux enjeux de durabilité.
- La définition du cadre managériale de la logistique maintenance en cernant la notion de management de la maintenance et des stratégies et politiques identifiées dans la littérature.

Afin d'approcher les pratiques managériales de la maintenance au sein des systèmes de production marocains dans le cadre du système logistique maintenance, on a mené une étude empirique (détaillée dans le chapitre 3) basée sur les résultats de 152 questionnaires répondus parmi 281 questionnaires distribués.

Les réponses collectées ont fait l'objet d'une analyse statistique détaillée qui a été menée sur le logiciel SPSS dans la finalité d'évaluer :

- Le niveau de communication interne et implication des opérateurs.
- Le niveau d'organisation de l'environnement logistique de travail.
- L'implantabilité du lean en logistique maintenance

- Le positionnement du retour d'expérience par rapport au système d'information et de communication de la maintenance.

Les résultats de cette analyse démontrent le besoin d'une meilleure implication du facteur humain ainsi que d'un modèle plus durable de la logistique maintenance, centré sur la dimension humaine pour la résolution des problèmes liés aux équipements tous en améliorant l'environnement logistique de travail. Dans l'objectif de répondre à ce besoin, nous discutons l'intégration de la philosophie lean ainsi que du retour d'expériences (dans les chapitres 4 et 5) en proposant un modèle générique étant un cadre durable pour améliorer :

- L'environnement logistique de travail identifiant et classant les types de gaspillages au niveau du système logistique maintenance et proposant l'outil 5SMS adapté pour une organisation quotidienne, efficace et pérenne des stocks de maintenance.
- L'implication du facteur humain, restant encore insatisfaisante comme témoigné par les résultats de l'étude empirique ainsi que les conclusions des deux études de cas, en proposant le modèle Lean/REX pour l'activation du REX dynamique afin de l'exploiter pour promouvoir la culture de résolution de problème et d'amélioration continue au niveau du sous-système physique en impliquant toutes les ressources entre autres l'opérateur de production en particulier.

Un modèle ne peut être utile sans un moyen d'implantation efficace, ce qui nous a incité à développer la plateforme de collaboration Smart TIPM 4.0, dans le dernier chapitre, concrétisant le modèle Lean/REX dans l'aire de l'industrie 4.0 et répondant aux enjeux de lutte contre la pandémie COVID-19 soutenant la mesure de distanciation physique entre les employés. Cette plateforme offre une alternative de communication et coordination à distance tout en assurant le suivi des améliorations via un tableau de bord d'indicateurs que nous avons conçu pour couvrir les aspects techniques et interactionnels.

Chapitre 1. Maintenance des systèmes de production

I. Introduction

Le présent chapitre s'instaure dans le cadre de l'évolution des systèmes de production définissant les grands traits de chaque système afin d'avoir une vision comparative entre eux permettant ainsi de définir l'environnement industriel de notre cadre de recherche.

La maintenance industrielle est une thématique de large étendue et une entité de rôle essentiel dans un système de production. Ainsi, la deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la définition des différentes formes organisationnelles de la maintenance ainsi que sa typologie afin d'expliciter son rôle au sein d'un système de production industriel.

II. Les systèmes de production industriels

1. Définitions et objectifs

1.1. Définition

Un système productif [FD X 60-000 (mai 2002)] : "système dont la finalité est de fournir un produit ou un service à un client extérieur au système".

"Un système de production est un ensemble de ressources (humaines et techniques) dont la finalité est de traiter (transformer) un flux d'éléments physiques afin de satisfaire une attente externe qui est l'attente des clients" [1].

Toutes ces définitions permettent de distinguer trois éléments essentiels composant le système de production industriel (comme le montre la figure 1): des ressources d'entrée (matière première et consommable), des ressources de sortie (les produits finis et le flux de déchet) et au milieu un processus industriel à valeur ajoutée employant des moyens humains et matériels.

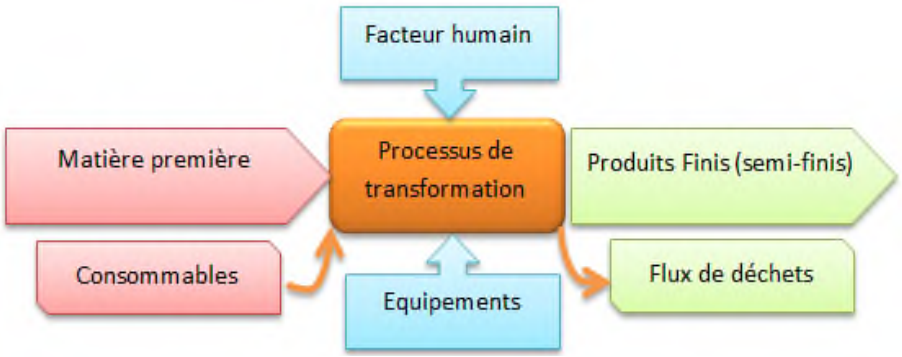


Figure 1. Schéma d'un système de production industriel.

1.2. Objectifs d'un système de production

Un système de production d'une entreprise vise l'addition de valeur à des biens ou à des services afin de répondre à des objectifs de quantité, de prix, de qualité et de délai comme le montre la figure 2. Ces objectifs souvent contradictoires, rendent difficile au système de production d'en trouver le compromis.

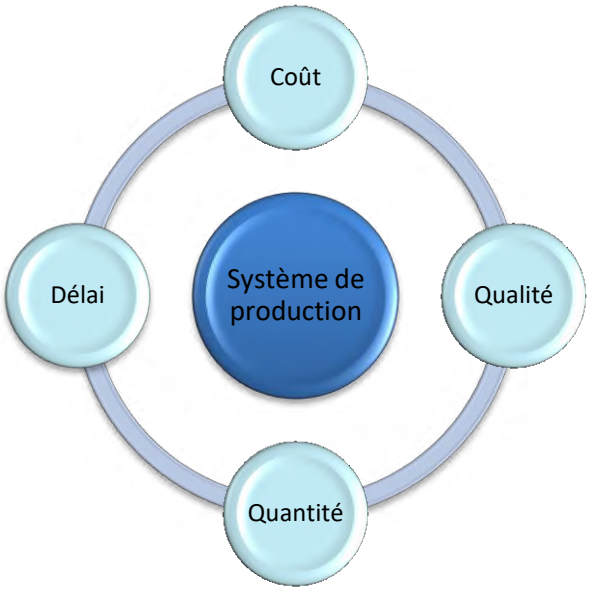


Figure 2. Objectifs d'un système de production industriel.

1.3. Sous-systèmes d'un système de production

Vue d'une approche systémique le système de production est composé lui-même d'un ensemble sous-systèmes communiquant entre eux par le bais des flux industriels comme le définissent Raymond et Stéphanie BITEAU dans leurs ouvrage "la maitrise des flux industriels" : « Le système de production, une agrégation de sous-systèmes tous orientés vers la satisfaction du client ». Les trois sous-systèmes constituant un système de production sont : le sous-système de décision ou de pilotage (chargé de la prise des décisions en se basant sur le flux d'information fourni), le sous-système d'information (qui diffuse l'information vers les deux systèmes, et le sous-système physique ou opérant gérant la transformation et le déplacement des éléments matériels (flux physique) afin de satisfaire l'attente du client [1]. Le système de production industriel peut être représenté par le schéma de la figure 3.

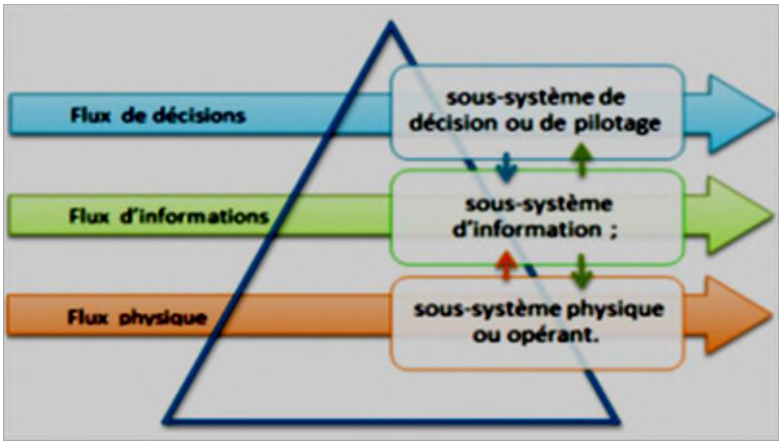


*Figure 3. S*chéma du système de production vue par l'approche systémique.

2. Les modèles des systèmes de production

Un système de production est une organisation utilisant un ensemble de ressources dans le but de fournir un produit/service conforme aux exigences du client. Cette notion ne cesse de se développer selon l'organisation du travail et des méthodes de production qui ont connu une évolution dès la production artisanale, à l'échelle de l'atelier ou de la manufacture, à la production industrielle au sein des firmes transnationales ayant comme point de départ l'industrie automobile. Au début du XX^{ème} siècle la production industrielle a connu plusieurs concepts qui ont défini les traits du système industriel à chaque phase de mutation.

2.1. Taylorisme

2.1.1. Esprit du Taylorisme

Inspiré du nom de son inventeur Frederick Winslow Taylor (1856-1915), le taylorisme repose sur l'organisation scientifique du travail (OST) en se référant à une analyse détaillée des modes de production (gestes, postures, cadences, …) pour aboutir au rendement souhaité aux moindres couts étudiant leur travail en chronométrant les tâches pour en conclure le temps exact de son exécution et éviter les gestes inutiles. Taylor a aussi mis l'accent sur la sélection des ouvriers, leurs spécialisations pour les tâches de contrôles et la rémunération équivalente au rendement (par pièce pour augmenter sa cadence).

Taylor a aussi insisté sur la spécialisation pour que chaque opérateur effectue toujours le même travail dans le but de le rendre plus efficace. Il a premièrement défini la "division horizontale du travail " qui implique une décomposition du travail en plusieurs taches simples et élémentaires dans une tentative d'augmenter la productivité. L'Organisation du travail a aussi met l'accent sur l'étude d'installation des postes limitant les aspects relationnels aux ateliers dans l'intention d'augmenter leurs cadences.

2.1.2. Principes et limites

Taylor a souligné les étapes importantes suivies pour l'organisation scientifique du travail aux ateliers de production : " L'étude de toutes les connaissances traditionnelles, leur enregistrement, leur classement et la transformation de ces connaissances en lois scientifiques. La sélection scientifique des ouvriers et le perfectionnement de leurs qualités et connaissances. La mise en application de la science du travail par des ouvriers scientifiquement entraînés. La répartition presque égale du travail exécuté dans l'entreprise entre les ouvriers et les membres de la direction" [2].
Plane a repris cette déclaration taylorienne en résumant le taylorisme en quatre principes marquants : la double division de travail (horizontale et verticale), le salaire au rendement et le contrôle du travail [3] :

- La Division Verticale

Dans cette structure deux nouvelles classes de travailleurs ont vu le jour "cols bleus" et "cols blancs" en classant les taches selon les catégories conception, contrôle et exécution.

- La Division horizontale

La division horizontale consiste à confier à chaque ouvrier des taches simples et répétitives introduisant le chronométrage et par conséquent un salaire relatif au rendement.

- Le salaire au rendement
- Le contrôle du travail

Le taylorisme a été critiqué par sa rigidité face aux changements, par la monotonie de ses méthodes et la pression exécrée sur les opérateurs. Le refus de L'OST, a été clairement exprimé à travers des taux élevés d'absentéisme, des grèves et actions de protestations organisées par les syndicats dénonçant les formes injustes d'exploitation notamment le chronométrage (initié en 1914) ce que yves cohen a nomé " des guerres contre le chronométrage " dans son ouvrage « Organiser à l'aube du taylorisme : la pratique d'Ernest Mattern chez Peugeot » [4].

Il a aussi défini le système Taylor ou encore le taylorisme selon une perspective ouvrière "pour les ouvriers militants le taylorisme désigne bien le trait majeur des transformations que connait le travail : fracture du monde industriel où les ouvriers qualifiés trouvaient encore place à leur désir d'innover, privation de leur maîtrise sur le processus de processus de production, diffusion d'un salaire aux pièces fondé sur le quadrillage des gestes. Dès lors, la parole ouvrière, du moins celle qui subsiste, portée par les syndicalistes, disait qu'il s'agissait bien là d'une histoire du " taylorisme ", terme qui recouvre la relance très armée des épreuves imposées au travail " [4].

2.2. Fordisme

2.2.1. Esprit du fordisme

Henry Ford a adopté une vision plus globale allant du design de l'atelier jusqu'au du produit [5]. Ainsi le modèle « Ford T », appelé à cette époque « le modèle universel », a été développé et commercialisé pour la première fois le 1er octobre 1908 introduisant un nouvel esprit de production [6].

2.2.2. Principes et limites du fordisme

Les principes du nouveau modèle Ford qui s'inspirent de L'OST de Taylor se résument par [7] :

- La division du travail et la parcellisation des tâches,
- Le travail à la chaine, initiant la production sur des chaines de montage afin de rythmer le travail des ouvriers en réduisant leurs déplacements.
- La standardisation des produits et l'interchangeabilité des pièces entres les différents modèles Ford.
- Les économies d'échelle et l'orientation vers des unités de production de grandes tailles ciblant la réduction des coûts de revient.

Quoique le modèle Ford a permis une croissance remarquable et simultanée en production, productivité et consommation, tout comme le taylorisme, le fordisme a fait l'objet de plusieurs critiques. Antonio Gramsci a décrit ce système comme une nouvelle forme d'organisation fondée sur la discrimination et l'épuisement de l'énergie de l'ouvrier par des taches pénibles ne pouvant pas être récompensés par les prétendus salaires élevés que Gramsci appelle "the so called hight wages". En effet la hausse des salaires n'était qu'une façon de rémunération provisoire et indirecte pour imposer des conditions dures de travails et pour lutter contre le renouvellement de la main d'œuvre [8], ce que témoins l'économiste Daniel Cohen en disant : " Si les travailleurs absorbent les gains de productivité générés dans l'usine, l'incitation à embaucher de nouveaux travailleurs s'y réduit considérablement [9]. Dans son ouvrage "La Société du spectacle", Guy Debord a affirmé que l'influence les modifications apportées par le fordisme dépasse le cadre de la production pour atteindre toute la société : "Avec la révolution industrielle, la division manufacturière du travail et la production massive pour le marché mondial, la marchandise apparaît effectivement comme une puissance qui vient réellement occuper la vie sociale" [10].

2.3. Critiques du taylorisme et fordisme

Les systèmes de production de Taylor et Ford ont été sujet aux critiques en absence d'un système adéquat d'organisation et de gestion pour la maitrise de ce mode de production de masse [11]. Les principaux points faibles de ces deux systèmes ainsi que leurs conséquences sont récapitulés dans le tableau 1.

Tableau 1. Principaux points faibles et critiques du Taylorisme et Fordisme et leurs conséquences.

Références		Points faibles des systèmes de production Taylor et Ford	Conséquences
[4] **[12]**	Friedmann, 1936 ; Cohen, 2001.	Déshumanisation du travail	Déclanchement du mouvement syndical et grèves des ouvriers.
[11]	Womack et al, 1990	Perte de qualification du travail ouvrier Monotonie Répétitivité	Accroissement des : Taux D'absentéisme Taux de rotation du personnel
[13] **[14]**	Coriat, 1979 ; Boyer, 1986	La parcellisation excessive des tâches Complexité des chaines de montage	Augmentation des Temps opératoires Difficulté d'équilibrage des flux
[11] **[7]**	Womack et al, 1990 ; Lyonnet, 2010	Control tardif de défauts dans la chaine de production	Conséquences financières importante

Le taylorisme et le fordisme ont monté des échecs en termes de flexibilité et adaptabilité aux exigences d'un marché changeant et évolutif aux États Unis et en Europe en termes de quantité produites, de diversité de produits, de leur qualité et plus tard en termes de délais, ce qui a déclaré par la suite le besoin d'un système plus souple répondant à ces contraintes.

2.4. Le Toyotisme

Afin d'aboutir à un système de production plus performant que ceux conçus par Taylor et Ford, plusieurs modèles ont fleuri cherchant à rendre l'organisation de travail plus flexible. Le succès a été remporté par le système de production TOYOTA inventé par Taiichi Ohno.

Le développement de l'entreprise Toyota fut dans sa première version en 1937 via la création de l'usine automobile « koromo », là où Toyota a opté pour la simplification des procédés au lieu de la division des

tâches qui est plus coûteuse comme elle fait son choix d'approvisionnement en outils et équipements flexibles et ajustable à tous les modèles [7].

Ce premier système considéré « semi-fordien » semblait répondant aux besoins du monde industriel japonais de l'époque vue la taille limitée de son marché japonais par rapport à celui américain jusqu'à la fin de la deuxième guerre mondiale ou Toyoda Kiichiro président de l'entreprise Toyota Motor a affirmé qu'il était nécessaire de rattraper l'industrie américaine dans un délai de trois ans afin de garantir la survie de l'industrie japonaise [15].

Pensant à une alternative à la production de masse américaine qui n'était plus pragmatique au contexte japonais vue la faible demande, l'ingénieur Taichii Ohno a inventé le nouveau système Toyota en se basant sur l'idée d'élimination des gaspillages définissant ces deux principes principaux : le juste à temps et l'autonomation (association de deux concepts : l'automation et l'autonomie) [15].

Contrairement au fordisme qui ciblait l'augmentation du bénéfice à travers une production de masse (raison pour laquelle tout le modèle Ford T est sorti en noir), le TPS (Toyota Production System) visait la fabrication des quantités limitées de plusieurs modèles sur une même ligne en essayant d'adapter le système fordien pour atteindre une meilleure qualité, des coûts plus faibles et des délais plus courts [16] tout en éliminant les sources de gaspillage. Cette culture est à l'origine du système lean.

2.5. Systèmes de production et enjeux de flexibilité

La flexibilité est devenue une notion importante imposée par les changements rapides et permanents de l'environnement industriel. Plusieurs auteurs lient cette notion à l'automatisation qui, seule, reste incapable de rendre le système de production flexible ou d'assurer son efficacité. "L'automatisation a pour but d'augmenter l'efficacité, diminuer la charge de travail de la main d'œuvre et réduire les erreurs causées par le facteur humain, or ces promesses ne sont pas toujours tenues" [18]. La flexibilité et l'adaptation sont deux concepts inséparables, en effet "De manière générale, la flexibilité est définie comme une capacité d'adaptation sous la double contrainte de l'incertitude et de l'urgence" [19].

L'absence de la vision interactionnelle au sein d'une structure industrielle rends la flexibilité de son système de production un objectif difficilement atteint. L'interaction primordiale à étudier est l'interaction entre les différentes ressources du système.

2.5.1. L'interaction Homme-MP

L'une des causes directes de gaspillage de la matière première est la mauvaise utilisation de celle-ci par un opérateur qui ne comprend pas ces spécificités et accorde peu d'intérêt à ses caractéristiques qui peuvent lui guider vers une utilisation plus correcte et optimale. L'amélioration de l'interaction Homme-matière

première est une responsabilité partagée entre l'opérateur et ces dirigeants (chef de section, responsable production, .. directeur général).

L'interaction entre deux autres unités importantes du niveau opérationnel d'un système de production : l'homme (ressource humaine) et la machine (ressource matérielle) constituera un obstacle devant la flexibilité du système lorsqu'elle est non maitrisée.

2.5.2. L'interaction Homme-Machine

L'Homme étant le facteur le plus réactif et dynamique dans un système de production constitue le moteur d'une interaction positive qui ne peut être établie en absence des qualités suivantes :

- Motivation

La motivation constitue l'engin de curiosité pour l'apprentissage, la connaissance et la maitrise de l'outil de production. Un ouvrier très compétent mais non motivé reste incapable d'interagir avec la machine.

- Qualification

Chaque machine nécessite certains prérequis afin de pouvoir comprendre ses mécanismes de fonctionnement et les moyens matériels et méthodiques de sa maintenance.

- Formation

La formation permet de développer et rendre polyvalentes les compétences du personnel pour répondre en permanences aux exigences de la révolution technologique.

- Implication

L'implication du facteur humain est une stratégie managériale très fructueuse (principe incontournable de l'amélioration continue) mettant en valeurs le savoir-faire de la main d'œuvre qui est en contact direct avec les machines et pouvant renseigner le feedback de cette interaction (l'interaction Homme-Machine). Ce feedback peut être très utile lors de :

– L'évaluation de l'état des machines,

– La résolution des problèmes liés aux machines ou même aux produits,

– Choix des machines dans le cas d'un nouvel approvisionnement,

Dans le but de réussir l'interaction Homme-Machine du côté Machine, celle-ci doit remplir certaines qualités :

– Facilité d'utilisation : à travers une communication conviviale par l'utilisation des pupitres et interfaces de commande facilitant le dialogue Homme-Machine dans le cas des systèmes automatisés.

– Maintenabilité aisée : cet objectif doit être formalisé dès la conception ou l'approvisionnement des outils de production.

– Documentation : certains documents doivent être fourni par le fournisseur de la machine alors que d'autres sont constitué dès son insertion dans le système de production. Cette documentation est souvent appelée "dossier machine".

L'importance de cette interaction est illustrée par la figure qui montre que le produit reste le fruit de l'interaction Homme-Machine étant un facteur d'influence sur sa qualité (un produit conforme reflète une interaction maitrisée en continu).

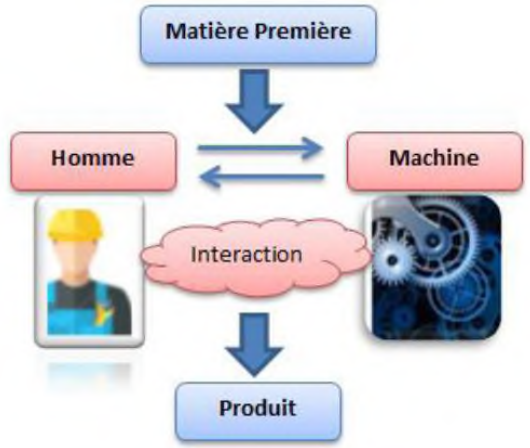


Figure 4. Interaction Homme-machine dans un système de production.

2.5.3. Impact des interactions entre les ressources sur le système de production

La réactivité du système de production peut être améliorée en maitrisant les interactions entre ses ressources humaines et matérielles. En effet pour assurer la disponibilité des moyens de production, la composante humaine de l'interaction " Homme-machine" doit être impliquée dans toute démarche d'amélioration.

Un système flexible et disponible en permanence grâce à l'interaction saine entre ses ressources, présente les avantages suivants : des produits finis (services) de bonne qualité car les erreurs seront prévenues, des livraisons dans les délais exigés, une satisfaction-client remplie et finalement une bonne image de l'entreprise sur le marché. Cela implique une diminution des coûts de non qualité, des coûts de maintenance et des pénalités de retard des livraisons, donc une augmentation du bénéfice.

3. Synthèse

Le système de production industriel est une notion complexe qui change de cadre, de principes et de pratiques d'une période à l'autre pour garantir la pérennité sur un marché qualifié par sa forte variabilité et

soumission aux contraintes de l'environnement industriel contemporain. Luttant pour gagner l'enjeu de flexibilité, l'histoire de la production industrielle a témoigné l'évolution du système industriel reconnaissant les changements apportés par le taylorisme, le fordisme et le toyotisme. Ces trois systèmes ont permis de passer d'une production quasi-artisanale à une production au plus juste à travers une production de masse [17].

III. Rôle de la maintenance dans un système de production industriel

1. Formes Organisationnelles de la maintenance

L'organisation et la structuration de la maintenance en tant qu'une fonction primordiale pour les systèmes de production a fait l'objet d'un grand nombre de travaux de recherche, de plus son rôle managérial demeure le point de convergence d'un nombre encore plus important de travaux dans des tentatives d'améliorer la disponibilité et la performance de cette fonction. En effet, Rosqvist et al ont signalé la forte dépendance entre la performance globale des structures industrielles et de la performance opérationnelle de leurs ressources [20].

Le cadre organisationnel du service maintenance peut différer selon les objectifs et besoins de l'entreprise. Marmier discute les formes d'organisation de la maintenance : La maintenance centralisée, décentralisée, la maintenance mixte. Il a cité deux politiques d'activité de la maintenance sous-traitée et la maintenance distribuée [21]. Pour ce dernier type Kaffel a distingué deux sous-types : la maintenance distribuée basée sur le partage et celle basée sur le partage et la collaboration [22].

Notre travail de thèse s'instaure dans le cadre d'une maintenance vue dans un contexte logistique favorisant l'interaction et la communication entre ses différentes ressources préservant et valorisant ses connaissances. Dans cette perspective, la forme organisationnelle la plus adéquate pour notre travail est la maintenance décentralisée vue ses avantages majeures en termes de communication et interaction entre les ressources du système de production, en termes de rapprochement des services (maintenance et production), de rapidité réactionnelle et donc d'efficacité opérationnelle. L'adéquation de cette forme a été témoignée chez les concurrents de qualité les plus réussis ayant adopté une maintenance proactive dans le périmètre d'une maintenance décentralisée comme l'a démontré une étude empirique menée sur un échantillon de 150 entreprises en Belgique et régions du Pays-Bas [23].

Une étude comparative entre les différentes formes organisationnelle de la maintenance a été réalisée, on se basant sur les traveaux de Marmier, Keller et Pinjala, est présentée dans le tableau 2 résumant le rôle, les avantages et inconvénients de chaque forme. .

Tableau 2. Tableau comparatif entre les différentes formes organisationnelles de la maintenance.

Type d'organisation	Forme d'organisation	Rôle	Avantages	Inconvénients
Interne	La maintenance centralisée	• Gestion des activités de maintenance dans un contexte multisites par la mise en place de l'atelier mobile : • Activités de réparation • Activité de maintenance préventive. • Inspections et remplacements.	• Gain de temps pour le personnel de production par l'élimination des tâches de maintenance de bas niveau. • L'exécution des activités de maintenance présentant des risques pour la sécurité est assurée par le personnel de maintenance.	• Ne s'occupe pas des problèmes liés à la production. • Cloisonnement des services production et maintenance chacun dans son service. • Difficulté de recueil de l'information.
	La maintenance décentralisée	• Gestion des activités de maintenance. • Réalisation d'une partie par le personnel de production (maintenance du niveau bas, diagnostique, suivi des améliorations…)	• Maitrise du processus de dégradation. • Maitrise des améliorations. • Meilleure prévention des pannes vue leurs détection rapide par l'opérateur de production • Facilité de collecte et communication de l'information. • Coordination plus favorisée vue la présence des services maintenance et production au même endroit.	• Nécessité d'un formalisme de coordination et communication entre la production et la maintenance.
	La maintenance mixte	• Le service maintenance assure les activités courantes. • La production s'occupe des activités logistiques	• Le système de production peut bénéficier des avantages des deux systèmes.	• Un bon niveau technique et une bonne connaissance des équipements sont recommandés pour les opérateurs, particulièrement pour les opérateurs de maintenance pour des

				raisons de mesure, diagnostique et interprétation. • Confusion entres les responsabilités • Allocation et répartition difficile des tâches entre la production et la maintenance.
Externe	La maintenance sous-traitée	• Sous-traitance d'une partie ou de la totalité des activités de maintenance.	• Bonne alternative à la maintenance des équipements de haute technologie et /ou nécessitant un haut niveau de spécialisation et d'expertise.	• L'entreprise risque la perte de certaines techniques. • Faible niveau d'autonomie
	La maintenance distribuée	• Se base sur une configuration sous forme de réseau, deux types de choix sont envisageables : • Le partage : quand la société fait partie d'un réseau d'entreprises qui se partage le service d'une même unité de maintenance • Le partage et la collaboration : ou le réseau est dynamique à travers la collaboration et la communication entre les entreprises du réseau.	• Possibilité de partage, de collaboration et de communication entre différentes entreprises.	• L'entreprise risque la perte de certaines techniques. • Faible niveau d'autonomie. • Nécessité de mis en place des capteurs pour la communication de la défaillance, dans le cas d'absence de ses capteurs ou d'erreur de fonctionnement la perte d'information est une conséquence inévitable. • L'intervention doit être connue à l'avance pour préparer le kit à apporter sur le site.

2. Définitions et Typologie de la maintenance

2.1. Définitions

La maintenance est une notion de large portée et champs d'application. Elle peut être définie comme l'ensemble de diverses interventions de maintenance (correctives, préventives, etc.) et la structure dans laquelle ces interventions sont prévues [24]. La norme française **NF EN 13306 (juin 2001)** présente une définition plus générique couvrant les concepts techniques, administratifs et managériaux :

« Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».

La notion de maintenance est souvent liée à celle de la défaillance qui est « La cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise ». Elle peut être partielle ou totale (panne) due à une cause appelée cause de défaillance ce que la même norme définit comme **«** raisons peuvent résulter d'au moins un des facteurs suivants : défaillance due à la conception, à la fabrication, à l'installation, à un mauvais emploi, par fausse manœuvre, à la maintenance ».

La panne comme définie par la norme **NF EN 13306 (juin 2001)** est un « état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures ».

2.2. Typologie de la maintenance

La maintenance est classée en deux types principaux :

2.2.1. La maintenance corrective

Exercée au besoin lorsqu'une défaillance est survenue. C'est une « stratégie de maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise » [**NF EN 13306 (juin 2001)**]. Cette stratégie de réparation qui est la première à être pratiquée au sein des systèmes de production peut être curative ou palliative.

2.2.2. La maintenance préventive

Intervienne avant l'occurrence de la défaillance. Cette maintenance est « exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien » [**NF EN 13306 (juin 2001)**]. De son tour, elle peut être classée en systématique, conditionnelle ou prévisionnelle (maintenance prédictive).

La norme de référence déjà citée précise que la maintenance systématique est « exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du

bien », alors que la maintenance conditionnelle est « basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent ». Quant à la maintenance prévisionnelle, la définition normative assure que son exécution suit les prévisions extrapolées issues de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs relatifs à la dégradation du bien.

En plus de ces principaux types de maintenance, Marmier souligne la notion de maintenance améliorative en la considérant l'une des stratégies de maintenance [21] c'est un ensemble de mesures mises en place pour améliorer la sûreté de fonctionnement du bien sans changer sa fonction première et ce par le biais de la maintenance [25]. La maintenance améliorative faisant partie des principes de la TPM (Total Productive Maintenance) est un concept important pour exercer les pratiques d'amélioration continue en maintenance.

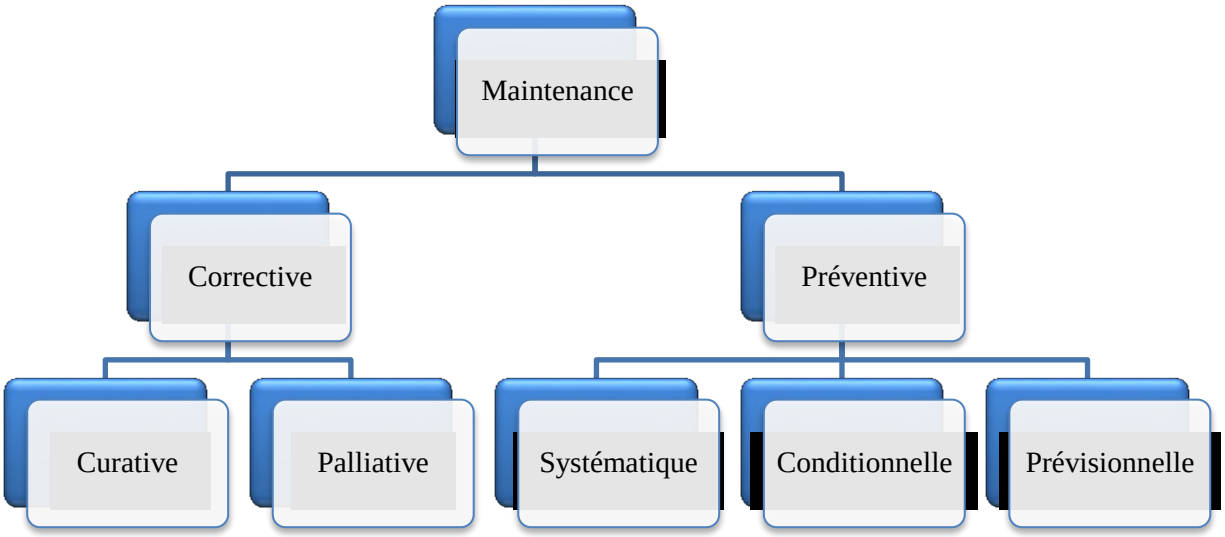


Figure 5. Les différents types de maintenance.

Les propriétés d'un équipement sont indispensables pour l'évaluation de son état et la construction d'une image proche à la réalité par la détermination des paramètres reliés à ces propriétés. La norme NF 13306 fournit les définitions cadres des principales propriétés : la disponibilité, la fiabilité, la maintenabilité et la durabilité, comme le montre le tableau 3.

Disponibilité	Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée.
Fiabilité	Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné.
Maintenabilité	Dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.
Durabilité	Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données d'usage et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint.

Tableau 3. Propriétés d'un bien [NF 13306].

IV. Conclusion

La flexibilité d'un système de production reste dépendante de la disponibilité du système principal et par conséquent de "la jonction opérateur/équipement". Cette valve indispensable pour le déroulement de la production en bonne conditions de fonctionnement ne peut être efficacement disponible sans un système de support qui veille en permanence sur la disponibilité opérationnelle des différentes ressources, ce qui nous renvoie à l'étude du rôle de la maintenance dans le contexte des systèmes de production industriels. Ce rôle central, dérivant ses traits des différentes formes organisationnels et typologiques et connaissant une évolution avec l'évolution des modèles productifs détaillés précédemment, reste décisif pour définir de nouveaux aspects et enjeux pour la notion de la maintenance.

Chapitre 2. Définition du cadre logistique de la maintenance

I. Introduction

La notion de logistique est un concept vaste couvrant un ensemble d'aspects. Le premier objectif de ce chapitre est d'introduire le cadre logistique de la maintenance à travers une première étude bibliographique décrivant l'évolution des travaux de recherches liés à cette thématique. L'étude et le classement de ces travaux selon les aspects logistiques en maintenance ont été menés dans la visée de définir nos principaux objectifs et orientations de recherche.

Le second objectif du présent chapitre est de cerner le cadre organisationnel de la logistique maintenance afin d'introduire la notion de la logistique maintenance et les notions connexes, définissant la logistique maintenance comme un système couvrant les aspects managériaux via les différentes politiques et stratégies définies au niveau du premier sous-système.

Dans l'intention de définir un cadre managérial basé sur une analyse de la littérature nous discutons le concept de management de la maintenance.

Les travaux de recherche liés à ce chapitre ainsi qu'au chapitres suivants ont été communiqués et publiés dans le cadre des conférences et congrès nationaux et internationaux ainsi que dans des journaux indexés.

II. Cadre logistique de la maintenance

1. Evolution des travaux de recherches dans la thématique de logistique de maintenance

Malgré le progrès de large étendue dans le secteur de la logistique et dans les disciplines de recherches qui en résultent, les travaux de recherche en logistique de maintenance restent limités. Pour nous situer par rapport aux travaux déjà établis et ceux en cours, nous avons traité des articles de plusieurs bases de données bibliographiques dans le but d'approcher la notion de la logistique de maintenance. Or pour avoir une vision claire et fiable sur les tendances de recherche au fil des années par rapport à notre thématique, nous avons analysé les résultats de recherche entre 1991 et 2017. On a analysé les articles indexés Scopus publiés dans les journaux et proceedings des conférences intégrés dans la base de données Scopus dans le domaine de la logistique de maintenance des systèmes de production, utilisant les termes « maintenance logistics production systems » comme principaux mots clés.

1.1. Tendance chronologique

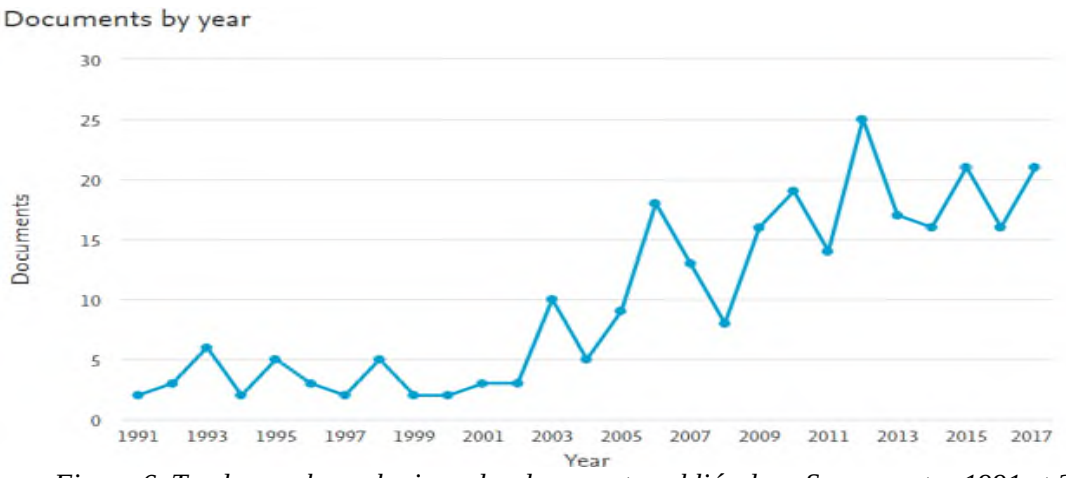


Figure 6. Tendance chronologique des documents publiés dans Scopus entre 1991 et 2017 [source : Scopus].

Le nombre total des articles de cette première recherche est de 266 documents. Commençant par la publication de deux documents en 1991 et finissant par la publication de 21documents en 2017 avec un pic de publication de 25 papiers enregistrés en 2012. Ces documents abordant la thématique de logistique de maintenance adoptent des cadres de travail différents liés aux champs de recherche.

1.2. Classification des résultats selon le champ du sujet

La classification des documents selon le domaine ou champ de sujet s'avère primordiale. La répartition de ces travaux selon le champ de recherche est détaillée par la figure 7.

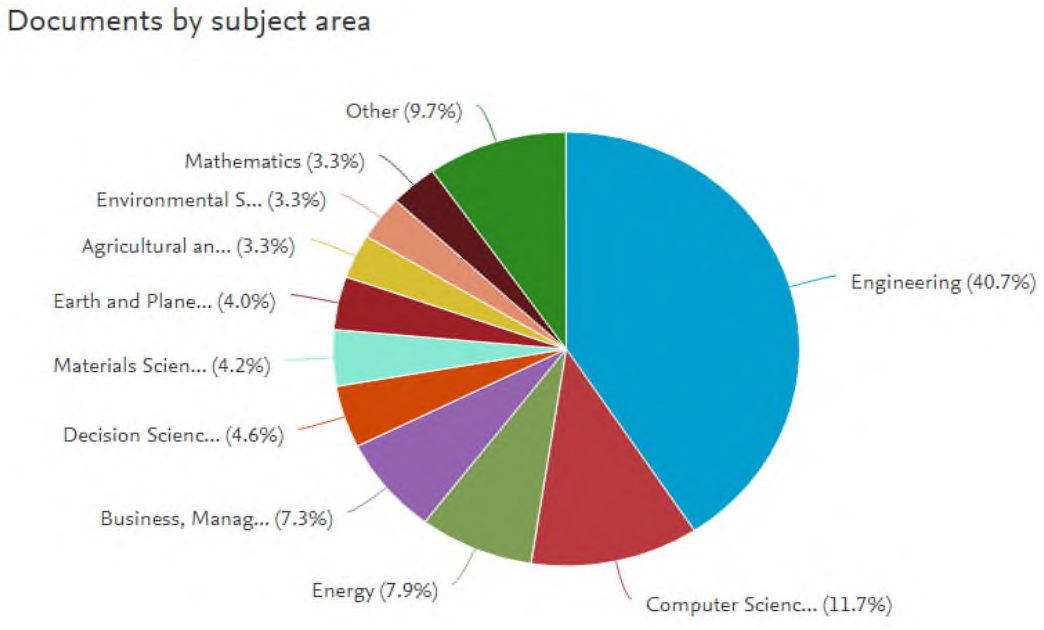


Figure 7. Classement des documents publiés selon le champ du sujet [source : Scopus].

L'analyse des travaux selon le champ ou domaine de recherche (ou champ de sujet) montre que 40,7% des documents soit l'équivalent de 185 papiers relèvent du domaine de l'ingénierie. Pour nous rapprocher encore mieux de notre thématique nous avons analysé la tendance de publication des documents dans la base de données Scopus entre 1991 et 2017 liés au champ de l'ingénierie.

1.3. Tendance chronologique des publications dans le champ de l'ingénierie

Afin d'avoir une vision générique sur la tendance des publications relatives à notre thématique nous avons analysé cette tendance entre 1991 et 2017.

La présente tendance chronologique montre une évolution graduelle croissante de publication de documents dans le champs de l'ingénierie abordant des problématique liés à la logistique de maintenance commençant par 1seul document en 1991 et arrivant à 13 documents en 2017 avec un pic de 16 documents enregistré en 2012 signalant que le nombre de documents en 2015 (la première année de recherche dans le cadre de cette thèse) était 9 documents abordant des sujets liés à la logistique de maintenance et montrant une faible relevance à la discipline du génie industriel.

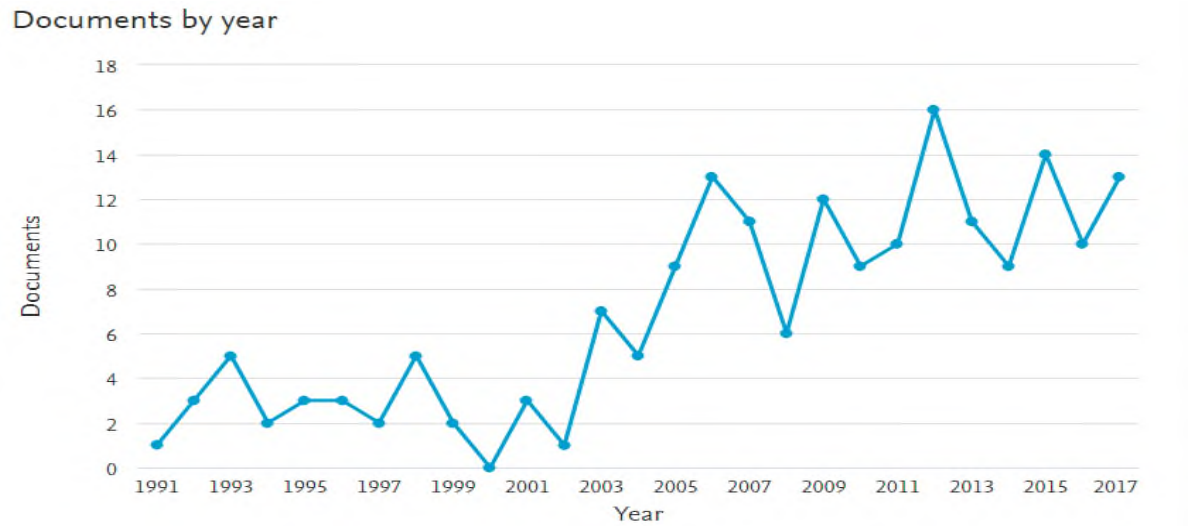


Figure 8. Tendance chronologique des documents publiés dans Scopus dans le champ ingénierie entre 1991 et 2017[source : Scopus].

1.4. Tendance mondiale des publications dans le champ de l'ingénierie

Dans l'intention de dresser les traits de la tendance de recherche dans cette thématique au niveau mondial et afin de pouvoir construire une première image sur la répartition mondiale des documents publiés dans la base de données Scopus nous avons procéder à une classification de nombre de documents par pays d'origine comme détaillé par la figure 9.

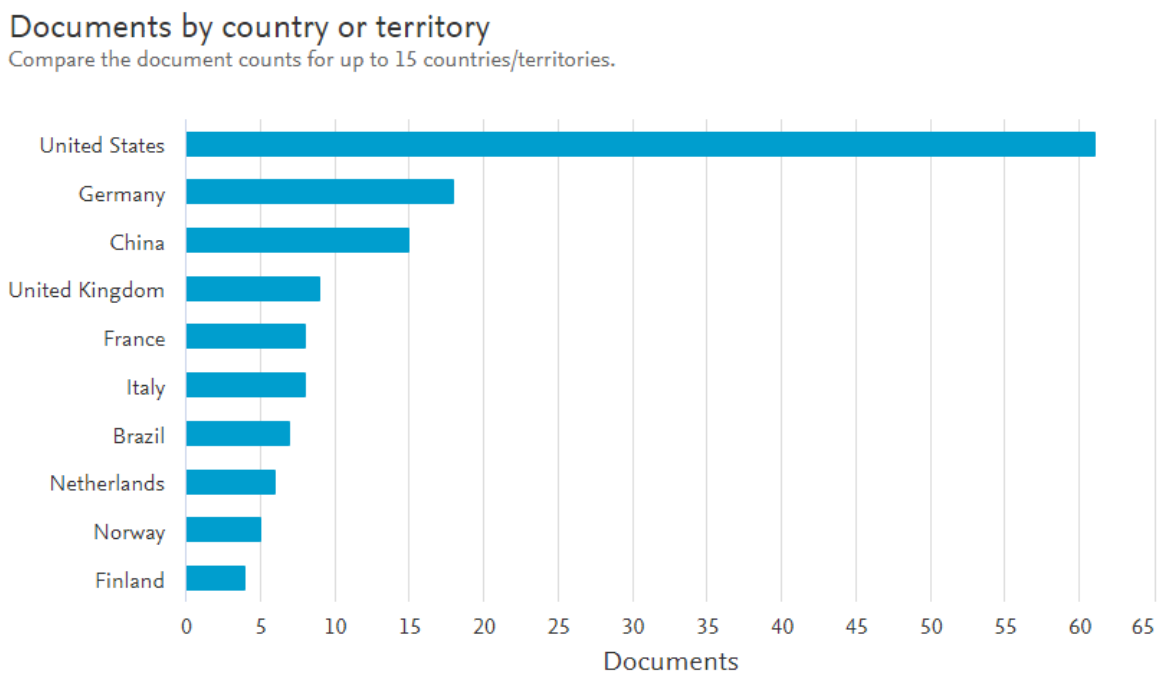


Figure 9. Classement mondial des documents publiés dans le champ de l'ingénierie entre 1991 et 2017[source : Scopus].

Les résultats de l'analyse montrent que les Etats Unis occupe la première position du classement pour un nombre de 61 documents publiés dans Scopus entre 1991 et 2017, suivi de l'Allemagne ayant publié 18 documents et la Chine occupe la 3ème position avec 15 documents publiés.

1.5. Classement des documents selon le type

L'ensemble des documents représentant les travaux de recherche de ses différents pays regroupe des articles publiés dans des journaux et revues indexées ainsi que des papiers de conférences.

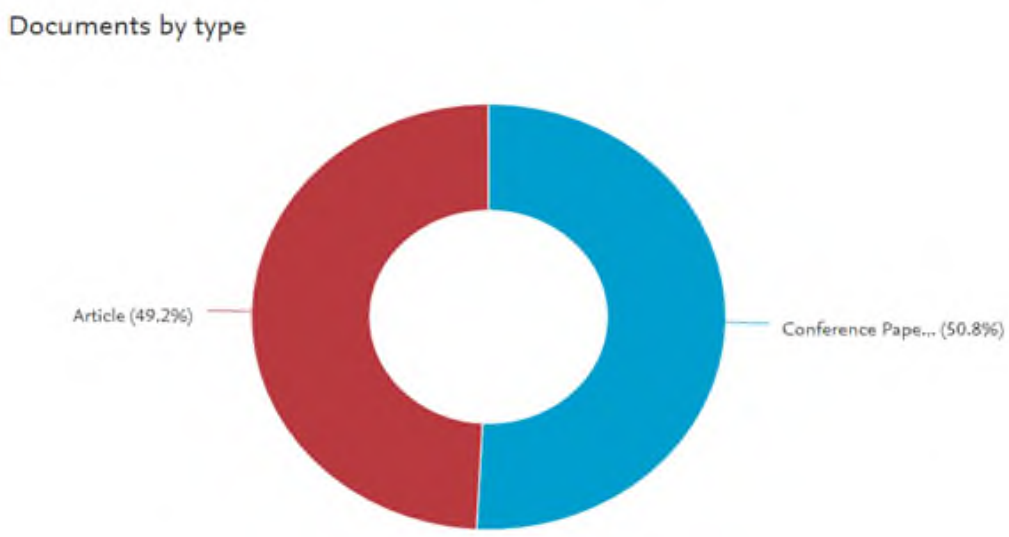


Figure 10. Classement des documents selon leur type [source : Scopus].

La figure 10 montre une répartition presque équitable en nombre entre les deux catégories. Le nombre d'articles publiés dans des journaux et revue constitue 49,2% de l'ensemble des documents soit 91 documents à-côté de 94 (50,8%) papiers de conférences publiés dans la base de données Scopus.

2. Aspects logistiques en maintenance

Pour élargir notre étendue de recherche nous avons analyser des références issues de différentes bases de données telle que Sciencedirect, Google Scholar, IEEE Digital Library et British Library afin de couvrir les concepts traités dans les travaux réalisés en maintenance dans un cadre logistique. Nous avons finalement retenu les références traitant la problématique de la logistique et management de la maintenance pour en ressortir tous les aspects logistiques qui permettent de redéfinir un cadre logistique générique de la maintenance et par ce, la notion d'une logistique de maintenance plus efficace portant sur des aspects techniques aussi bien que managériaux.

Le classement de ces références est récapitulé dans le tableau 4.

Tableau 4. Classement des documents selon les aspects logistiques traités en maintenance.

Références		Poulsen, Hasager, Jensen, 2017.	Dietrich, Daneshjo, Danishjoo, 2017	Alonso, Rubio, de Agustina, & Domingo, 2017.	Eruguz, Tan, Houtum, 2017	Mahmoud shafiee, 2015	Lewandowski, Oelker,2014	Kim, Cohen, and Netessine,2007	Negri, Perotti, S., Fumagalli, Marchet, & Garetti, 2017.
		[126]	[127]	[128]	[129]	[130]	[131]	[132]	[133]
Aspects logistiques en maintenance	Pays / région d'étude	Suisse	États-Unis	Espagne	Pays-Bas	Royaume-Uni	Allemagne	États-Unis	Italie
	Gestion des pièces de rechange				✓	✓	✓	✓	
	Gestion des ressources humaines et/ou TIC								✓
	Optimisation des méthodes /Choix des politiques/ stratégies de maintenance	✓	✓	✓	✓	✓			
	Organisation des locaux, équipements et outillage								

Références		Sherwin, 2000	Arslankaya , and Atay, 2015	Singh, Gohil, Shah, and Desai, 2013	Alsubaie, and Yang, 2016	Muthu, Devadasan, Ahmed, Suresh, and Baladhandayutham, 2000.	Madu, 2000.	Wan, Li, Gao, Roy, and Tong, 2017.	Candell, Karim, and Söderholm, 2009
		[134]	[62]	[135]	[136]	[137]	[138]	[139]	[140]
Aspects logistiques en maintenance	Pays / région d'étude	Suède	Turquie	Inde	Royaume-Uni	Inde	États-Unis	Chine	Suède
	Gestion des pièces de rechange								
	Gestion des ressources humaines et/ou TIC	✓						✓	✓
	Optimisation des méthodes /Choix des politiques/ stratégies de maintenance	✓	✓	✓	✓				
	Organisation des locaux, équipements et outillage		✓				✓		

Références		A. W. Veenstra, R. Zuidwijk, and B. Geerling, 2006	López Campos, Crespo Márquez, 2009.	S. Ghayebloo and K. Shahanaghi,2010	Nowicki, Kumar, Steudel, Verma,2008	Löfsten, 1999	Macchi, Roda, and Fumagalli, 2017	J. D. Morales Méndez and R. S. Rodriguez, 2017	Garg and Deshmukh, 2006
		[141]	[142]	[143]	[144]	[145]	[48]	[146]	[147]
Aspects logistiques en maintenance	Pays / région d'étude	Pays-Bas	Espagne	Iran	États-Unis	Suède	Italie	Colombie	Inde
	Gestion des pièces de rechange	✓		✓	✓		✓		
	Gestion des ressources humaines et/ou TIC								
	Optimisation des méthodes /Choix des politiques/ stratégies de maintenance		✓	✓		✓	✓	✓	✓
	Organisation des locaux, équipements et outillage								

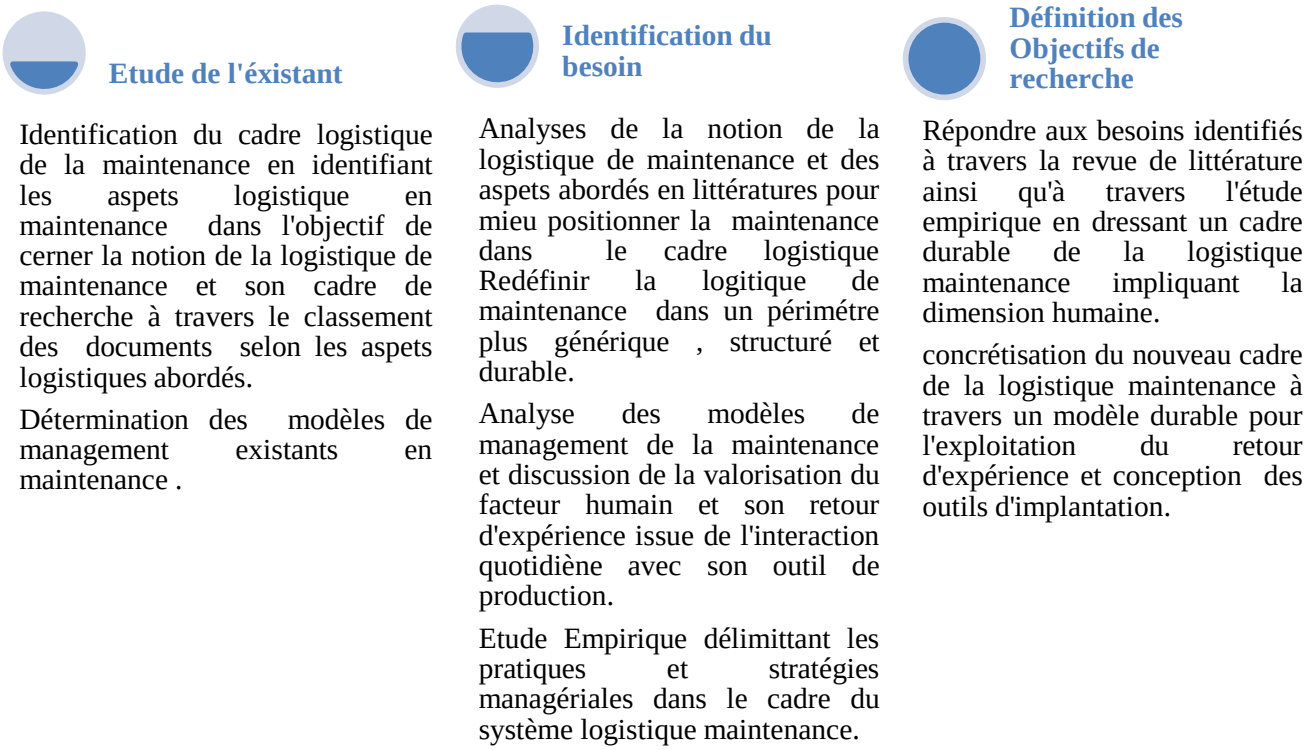
Références		Chelbi, and Ait-Kadi, 2004.	Chen, Chen, and Yuan, 2003.	Naji, Beidouri, Oumami, & Bouksour, 2016.	Fraser, 2014.	Fraser, Hvolby, and Tseng, 2015	. Ahuja, et Khamba, 2008.	Chankov, Becker, Windt, 2014.	Lai, 2007.
		[148]	[149]	[150]	[151]	[53]	[52]	[35]	[102]
Aspects logistiques en maintenance	Pays / région d'étude	Tunisie	Taïwan	Maroc	Australie	Australie	Inde	Allemagne	Taïwan
	Gestion des pièces de rechange								
	Gestion des ressources humaines et/ou TIC								✓
	Optimisation des méthodes /Choix des politiques/ stratégies de maintenance	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Organisation des locaux, équipements et outillage								

Références		Lejarraga, Gonzalez, 2011.	Kamsu-Foguem, Coudert, Beler, Geneste, 2008.	Arslankaya, Atay,2015	Baluch, Abdullah, Mohtar, 2012	Hassanain, Froese, Vanier, 2001.	Duong, Paché, 2015.	Caplice, Sheffi, 1995.
		[109]	[110]	[62]	[65]	[152]	[153]	[154]
Aspects logistiques en maintenance	Pays / région d'étude	États-Unis	France	Turquie	Malaisie	Canada	France	États-Unis
	Gestion des pièces de rechange						✓	
	Gestion des ressources humaines et TIC	✓	✓			✓	✓	
	Gestion et optimisation des méthodes /Choix des politiques/ stratégies de maintenance			✓	✓	✓		✓
	Organisation des locaux, équipements et outillage						✓	

3. Synthèse

L'analyse bibliographique réalisée nous a permis de témoigner une tendance chronologique croissante malgré le nombre limité des publications abordant la maintenance dans un cadre logistique et particulièrement la logistique de maintenance au sein des systèmes de productions industriels. Ce qui explique la croissance de conscience de l'importance de cette thématique de recherche d'actualité vue l'intérêt de l'étude des systèmes logistiques dans un environnement industriel régie par les enjeux de globalisation, des marchés évolutifs et interconnectés. Ça reflète aussi la fertilité de ce domaine et son besoin persistant des travaux de recherches pour enrichir et développer des solutions dans cette thématique. Le traitement de ces références a été effectué dans le cadre des deux premières étapes du processus de la figure 11, permettant l'étude du contexte lié à notre problématique de recherche et l'identification de nos besoins future afin de définir nos objectifs de recherche.

Figure 11. Processus de traitement de la problématique de recherche.



Le but d'analyser les démarches de recherche existantes et contributions dans le domaine de la maintenance et son management dans un cadre logistique est d'élargir notre étendue de recherche pour couvrir tous les aspects logistiques en maintenance, en s'intéressant en premier lieu aux travaux mentionnant à la logistique de maintenance qui demeure très limité en nombre et relevance par rapport à l'étude de la

logistique de maintenance dans le contexte des systèmes de production. Les besoins de recherche définissant les traits de la problématique ont été identifiés par rapport à la notion de la logistique de maintenance et son positionnement, ces besoins sont à l'origine de l'orientation de nos travaux dans les chapitres qui suivent, décrivant ainsi la piste de recherche à suivre dans deux axes principaux : l'axe organisationnel de la logistique de maintenance et l'axe managérial.

À la suite de ce traitement nous avons réalisé les constatations suivantes résumées selon les deux axes précédents :

- Axe organisationnelle de la logistique maintenance

La logistique maintenance demeure peu abordée dans le cadre organisationnel, et non définie dans une vision générique. L'attention des travaux a été souvent de préoccupation technique discutant l'un des axes logistiques de façon indépendante. D'autre part cette notion a été employée pour décrire quelques ressources de la maintenance dans une perspective d'organisation de la centralisation de la maintenance et rarement discutée dans le contexte d'une logistique maintenance interne dans un système de production.

- Axe managériale de la logistique de maintenance

Le traitement de la dimension managériale en maintenance reste souvent discuté dans un périmètre stratégique isolé de l'environnement d'implantation, de ses ressources et leur interaction et par conséquent l'opportunité d'amélioration en maintenance reste affaiblie en absence de l'exploitation du résultat de cette interaction autrement dit : en absence du retour d'expérience des opérateurs de production en particulier. En effet, la logistique maintenance reste non explorée dans une dimension managériale valorisant le résultat de l'interaction entre l'opérateur de production et son équipement (l'interaction Homme-Machine).

4. Orientations et objectifs de recherche

Dans l'optique de cerner le contexte conceptuel de notre travail qui a pour but de dresser un nouveau cadre managérial de la maintenance, nous proposons une redéfinition de la logistique maintenance et sa position par rapport au système de production et de son rôle managérial pour répondre aux objectifs suivants :

- Déterminer un cadre générique et durable couvrant tous les aspects techniques et managériaux de la maintenance.
- L'amélioration de l'interaction Homme-machine en valorisant le retour d'expérience qui en résulte afin d'aboutir à une culture de résolution des problèmes et d'amélioration continue en maintenance.

Pour ce deuxième objectif qui s'inscrit dans une dimension managériale gérant les ressources de la logistique maintenance et leur interaction (l'interaction de l'opérateur avec l'équipement en particulier) nous avons analysé les différents modèles de management de la maintenance portant sur les politiques et stratégies de la maintenance, leurs évolutions dans le contexte des systèmes de production , comme nous avons mené une étude empirique permettent d'approcher cette dimension dans le cadre du système logistique maintenance afin de déterminer par la suite la piste permettant le passage du management de la maintenance au management de la logistique maintenance dans un cadre durable en valorisant le retour d'expérience du facteur humain.

III. Logistique maintenance : définition du cadre organisationnel

1. La logistique

La logistique selon la norme AFNOR X 50-600 est une fonction "dont la finalité est la satisfaction des besoins exprimés ou latents, aux meilleures conditions économiques pour l'entreprise et pour un niveau de service déterminé. Les besoins sont de nature interne (approvisionnement de biens et de services pour assurer le fonctionnement de l'entreprise) ou externe (satisfaction des clients). La logistique fait appel à plusieurs métiers et savoir-faire qui concourent à la gestion et à la maîtrise des flux physiques et d'informations ainsi que des moyens". C'est en effet "la conception et le fonctionnement requis du système physique, managérial et informatique pour permettre à la marchandise de traverser le temps et l'espace" [31]. C'est aussi "un processus de planification, d'implantation et de maitrise des flux d'efficacité et de rentabilité, du stockage de la matière première, des encours, des produits finis et des informations qui y sont reliées du point d'origine jusqu'au point de consommation afin de répondre aux exigences des clients". L'ASLOG (Association française pour la logistique) définit la logistique par l'ensemble des activités ayant pour but la mise en place, au moindre coût, d'une quantité de produit à l'endroit et au moment où une demande existe [32]. La logistique met l'accent sur une dimension centrée sur la disponibilité associée aux "7 Rs": "the Right goods, the Right amount, the Right condition, the Right place, the Right time, the Right customer and the Right costs" (les bonnes produits, la bonne condition, le bon endroit, le bon temps, bons clients et coûts)[34]. Chankov, Becker and Windt signalent la nécessité de de surmonter la méthode passive de caractérisation de la logistique en rajoutant l'aspect de synchronisation à la définition de la logistique pour en faire "une perspective active" [35].

La logistique de soutien vise à assurer, dans les meilleures conditions économiques, la disponibilité des systèmes durant leurs cycles de vie en tenant compte des conditions données d'utilisation. L'offre des moyens et prestations mis en œuvre pour atteindre ces objectifs est communément appelée "soutien logistique" NF X60-600 [28].

2. Soutien logistique

Ensemble structuré des produits ou services nécessaires à un client pour assurer : le maintien de la disponibilité du système principal, et le maintien en condition de tout ou partie de lui-même (outillage, rechange, simulateur, documentation, infrastructure).[26]

Furon, Blanchard, Prévost et Waroquier discutent la classification du soutien logistique étant constitué de neuf éléments spécifiés par les normes MIL STD 1369 et 1388/1A et qui sont des fonctions et ressources classés en trois catégories [27][29][30] : La catégorie "maintenance", La catégorie "gestion du personnel " et La catégorie "environnement" , pour conclure que "le système de soutien constitue l'ensemble des ressources mettant en œuvre l'ensemble des fonctions du soutien logistique" [27].

La catégorie maintenance par exemple regroupe :

- La gestion des faits techniques et le plan de maintenance,
- La documentation et la gestion des données d'exploitation et de maintenance
- Le soutien des moyens informatiques de tests et de soutien,
- L'approvisionnement des rechanges,

La formation des personnels d'exploitation et de maintenance.

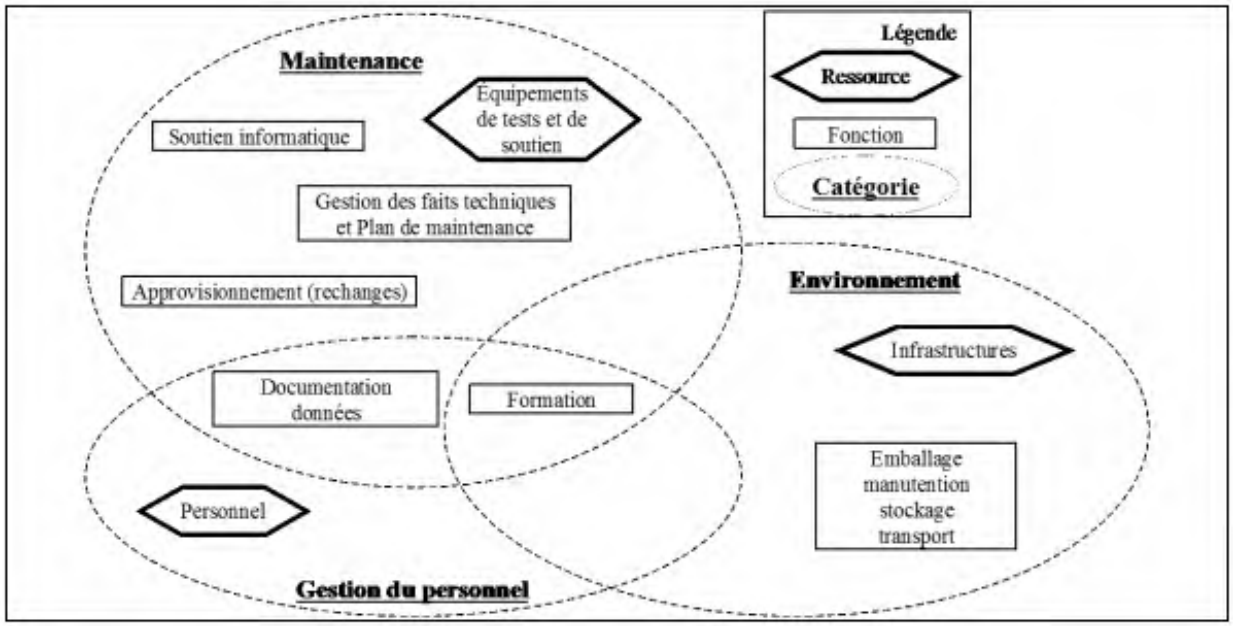


Figure 12. Les fonctions et ressources du soutien logistique [27].

Pour Furon, le système de soutien logistique est lui-même constitué d'un système principal et un système de soutien dans un processus itératif [27].

3. Soutien logistique intégré (SLI)

Ensemble des tâches techniques et de gestion nécessaire pour spécifier, réaliser et maintenir en condition opérationnelle le système de soutien logistique [26]. Le soutien logistique intégré qui a été fondé par les militaires américain a pour principaux objectifs l'intégration du système de production dès la conception [27] pour répondre aux objectifs [33] :

- Optimisation du rapport disponibilité opérationnelle / coût global de possession des systèmes tout en répondant simultanément aux exigences des utilisateurs et à ceux du soutien,
- Intégration des différents éléments de soutien (équipement de test et de soutien, rechanges…), dès la phase de conception, en assurant leur cohérence,
- Considération du système dans sa globalité incluant à la fois le produit principal et son système de soutien.

4. Position de la logistique maintenance

La relation entre le système de production, la logistique maintenance, le soutien logistique et le soutien logistique intégré est une relation de dépendance et de soutien que nous résumant en deux types de système : système principal et système de support. La position de la logistique maintenance entre ses systèmes est centrale, et constitue une liaison indispensable entre les systèmes de support et le système principale. La logistique maintenance est le cœur du système de support. C'est un système de support en elle-même, chargé de la mission de veille sur le système principal dont l'objectif primordial est d'assurer sa disponibilité en permanence.

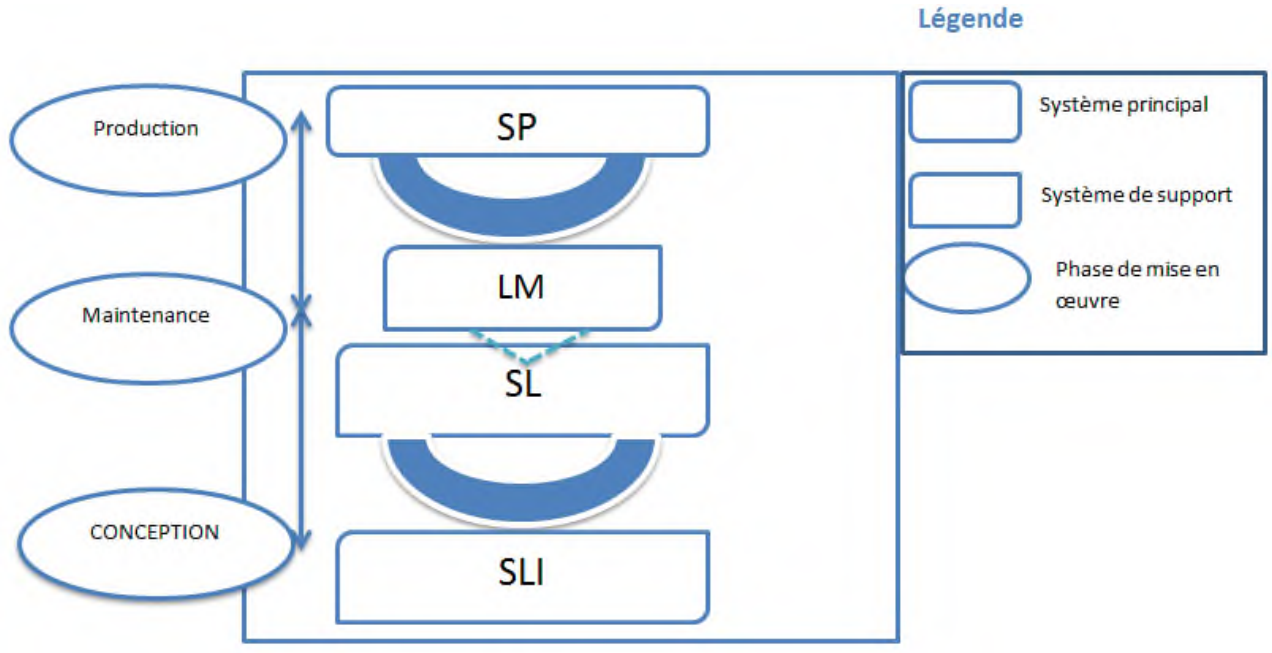


Figure 13. Position centrale de la logistique maintenance dans un système de production industriel.

5. Enjeux de durabilité

La préoccupation mondiale majeure de nos jours est la préservation des ressources de la planète. Témoignant les conséquences désastreuses de la révolution industrielle et de l'épuisement des ressources, L'incitation aux initiatives du développement durable s'est exprimée alarmante. Le terme développement durable qui est largement employé comme énoncé par B.Hopewood, c'est un concept qui tente de rassembler et faire converger les intérêts vers les problématiques environnementales et socioéconomiques pouvant dresser les enjeux actuels et futurs pour la préoccupation de l'humanité [37].

La définition plus communément connue du développement durable est celle donnée par le rapport de Brundtland "le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre l'aptitude des générations futures à répondre à leurs propres besoins"[38]. Pour Diesendorf , la définition du rapport met l'accent en particulier sur l'équité des deux générations (présente et future) et tandis que le mots "besoins"("needs"), paraissant comme "désires" ("wants"), fait référence aux besoins écologiques et ceux d'une " société juste" et une " économie saine", ça n'était pas déclaré si clairement et explicitement. Ainsi, Diesendorf énonce sa propre définition considérée plus claire et de portée plus large reflétant les trois aspects du développement durable " le développement durable comprend les types de développement économique et social qui protègent et améliorent l'environnement naturel et l'équité sociale [39].

La durabilité qui est le but ou le résultat final pointé par le processus du développement durable [39] est devenue parmi les problématiques les plus importantes du XXIe siècle nécessitant une implication mondiale pour faire face à ses défis pour l'utilisation des matériaux et des ressources [40]. La plupart des définitions et déclarations de la littérature mentionnent le mot « défis » lié à la durabilité et au développement durable. Ces défis doivent être traités sous une triple dimension considérant les trois piliers du développement durable (D.D) (société, environnement, économie).

La vision générique qui permet d'atteindre la durabilité dans tous les systèmes, y compris les systèmes de production industriels, est le management des ressources basé sur les trois piliers du D.D pour parler d'un management durable des ressources (figure 15).

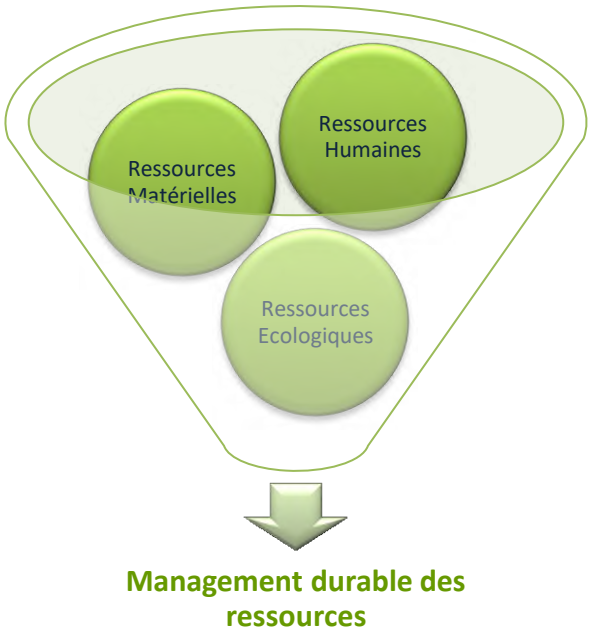


Figure 14. Management durable des ressources [158].

Lorsque l'on aborde la durabilité dans le contexte industriel actuel, la logistique est le terme approprié dans le besoin d'être qualifié de durable. En réalité, la durabilité nécessite une vision globale couvrant tous les aspects humains, matériels et économiques, afin de voir ses résultats dans les trois piliers du développement durable. L'un des chemins de concrétisation de cette vision est le management de la logistique, ou plus particulièrement le management de la logistique maintenance.

6. Logistique maintenance : une nouvelle définition dans le cadre de l'approche systémique

Selon la norme NF EN 13306, la logistique de maintenance est "l'ensemble des ressources, services, et moyens de gestion nécessaire à l'exécution de la maintenance. La logistique de maintenance peut inclure par exemple le personnel, les équipements d'essai, les ateliers, les pièces de rechange, la documentation, les outils, etc." [26].

Notre objectif conclus du chapitre précédent est de pouvoir converger vers une nouvelle définition portant sur tous les aspects identifiés.

Afin de redéfinir la maintenance dans un cadre logistique générique englobant les aspects techniques et managériaux, la maintenance étant un système de support pour le système de production considéré un système principal, on adoptera la terminologie "logistique maintenance". En d'autres termes dans le contexte d'un système de production et dans le cadre de notre approche, on considère la maintenance un système logistique interne. La logistique maintenance gère les différentes ressources nécessaires à l'exécution de la maintenance qui peuvent être classées en matérielles et non matérielles : les locaux et

stocks de pièces de rechanges, les consommables nécessaires à la maintenance (graisse, essence de nettoyage.), personnel de maintenance, l'outillage, la documentation et traçabilité de la maintenance (dossier machine, rapports d'interventions, etc.), méthodes... [42].

La définition de la logistique de maintenance (LM) étant rarement identifiée et superficiellement abordée dans la littérature, reste éloignée de sa position interne aux systèmes de production industriel. Afin de mettre cette notion hors toute ambiguïté, nous proposons une nouvelle définition considérant la LM comme un ensemble de sous-systèmes inclus dans un système plus large (système de production industriel) [41].

La logistique maintenance vue par l'approche systémique peut être considérée un système de support composé de trois sous-systèmes communiquant entre eux par le biais des flux ascendants et descendants [41][42] (figure 15) :

*01. Le sous-système de management stratégique de maintenance (**MSMS** : Maintenance strategic management subsystem) :*

Il prend les décisions adéquates et définit les choix techniques d'améliorations de la disponibilité du système principal, autrement dit, il assure le management stratégique de la maintenance et ses ressources en définissant les méthodes d'implantation des politiques et stratégies de maintenance choisies. Ce sous-système doit prendre en considération les objectifs et contraintes de production dans une vision collaborative. Cette perspective reste le point critique des systèmes de production actuel soufrant d'un cloisonnement des services ce qui fait appel à un autre sous- système permettant la communication entre les deux sous-systèmes (01 et 03) ainsi qu'entre les services (assurant la coordination avec le service production)

*02. Le sous-système d'information et communication de maintenance (**MICS** : Maintenance Information and communication subsystem) :*

Il gère la documentation, les bases de données de la maintenance et le flux d'information reflétant l'image de l'état des machines et leur disponibilité. Il est capable d'assurer la communication entre les deux autres niveaux en remontant le flux d'information du niveau inférieur et communiquant les alternatives d'amélioration du niveau supérieure. Le point fort de ce système dans le périmètre d'une logistique maintenance collaborative est la coordination entre les différentes ressources.

*03. Le sous-système physique de maintenance (**MPS** : Maintenance Physical subsystem) :*

Il gère opérationnellement les outils, locaux et stocks de pièces de rechanges ainsi que le personnel de maintenance. L'implantation des standards et pratiques définit par le sous-système de management stratégique de maintenance est assurée à ce niveau.

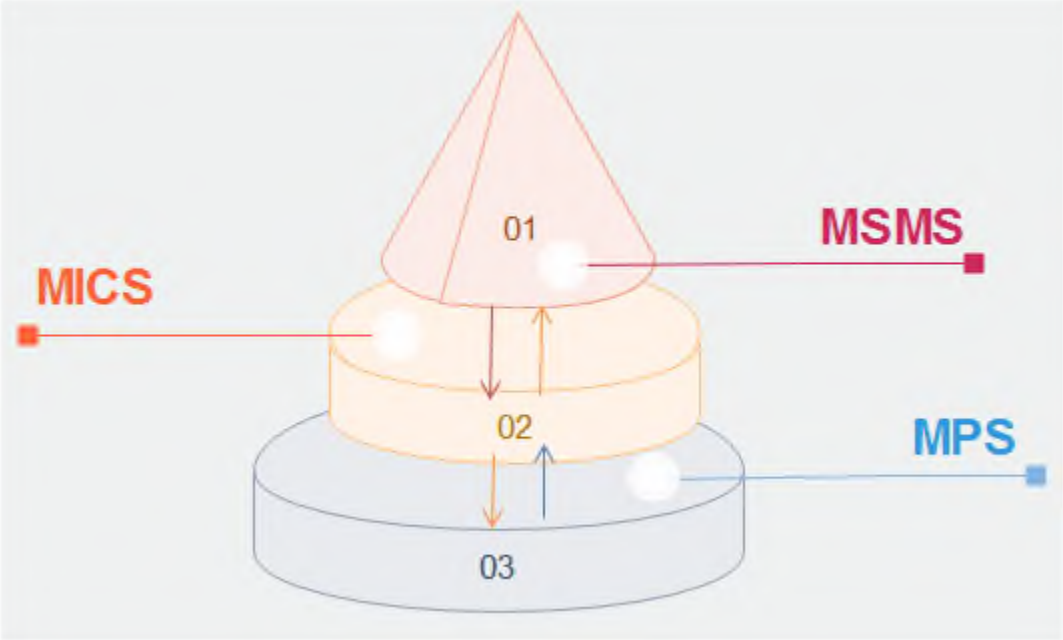


Figure 15. Le système logistique maintenance [41].

La logistique de maintenance peut être vue comme un système inclus dans d'autres systèmes tels que le système de production ou plus généralement le système chaîne logistique, comme le montre la figure 16.

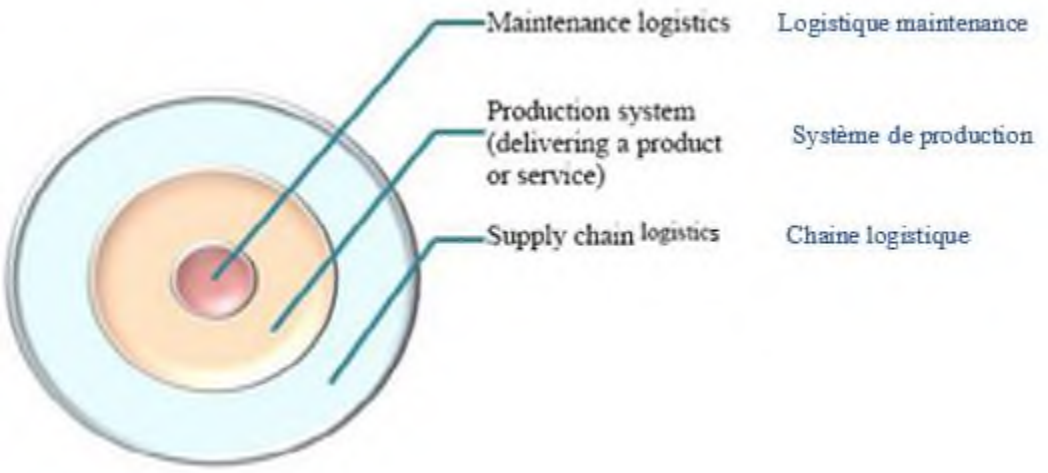


Figure 16. Position générale de la logistique maintenance [41].

7. Ressources de la logistique maintenance

Les fonctions de ce système de support ne peuvent être accomplies sans un ensemble de ressources dont on cite :

- Les équipements :

- Machines ou outils de production caractérisés par une diversité fonctionnelle et technologiques et nécessitant par ailleurs un niveau de qualification ou d'expertise différent.
- Les pièces de rechange.

L'exécution des opérations de maintenance est étroitement liée à la gestion des pièces de rechange. Plusieurs stratégies de gestion des pièces de rechange sont abordées en littérature. Kennedy et al classifient les papiers traitant la gestion des pièces de rechange selon six axes [36] :

- Aspects managériaux tels que les méthodes d'organisation et réduction des stocks des pièces de rechanges.
- Remplacement basé sur la durée de vie.
- Problèmes multi-échelons.
- Problèmes d'obsolescence.
- Pièces de rechange réparables.
- Applications spéciales

- L'outillage

Les interventions de maintenance étant d'une importance majeure pour les équipements du système de production, ne peuvent être réalisées en absence de l'outillage adéquat. Plusieurs types d'outillage peuvent se présenter selon la complexité de l'intervention, la caractéristique de l'équipement et la nature du problème ou de la panne. Parmi ses types [21] :

- L'outillage déplaçable dont on identifie deux sous-types : L'outillage courant utilisable par chaque opérateur de maintenance telle que la caisse à outils, et l'outillage spécifique ou coûteux présent en quantité limité.
- L'outillage lourd présent dans les locaux de maintenance et ne pouvant pas être déplacé.

Les ressources les plus importantes à côté des équipements et de l'outillage et en même temps les plus difficile à gérer sont les ressources humaine, caractérisés par leurs compétences ils servent de fer de lance pour les activités de maintenance comme déclaré par Marmier [21].

- Le personnel

C'est une ressource de rôle principal assurant les opérations de maintenance, les ressources qualifiées sont un potentiel d'amélioration indispensable pour la disponibilité du système de production. La littérature aborde souvent les opérateurs ou technicien de maintenance et le responsable maintenance comme seules ressources de maintenance. Dans le contexte de notre nouveau cadre de recherche la logistique maintenance est un système qui gèrent non seulement le personnel de maintenance mais c'est un système de forte communication et collaboration avec les ressources de production plus particulièrement avec les opérateurs de production dans une perspective de valorisation du feedback de l'interaction quotidienne de l'opérateur

de production avec son outil de production. Pour discuter ce type d'interaction dans la suite de notre travail on adopte l'appellation interaction Homme-machine.

8. Synthèse

Une logistique durable de maintenance (ou une logistique maintenance durable) (LDM ou SML (Sustainable Maintenance Logistics) est un système gérant des ressources matérielles et non matérielles dans le but de maintenir le système principal en améliorant sa disponibilité opérationnelle afin de satisfaire le client tout en répondant aux exigences environnementales, sociales et économiques du développement durable. En effet la mission principale de la LDM est de soutenir par la maintenance le système principal en respectant le capital naturel, social et économique. Or le capital social reste la dimension la plus compliquée et la plus intéressante et prometteuse qui peut orienter les systèmes de production vers le chemin de durabilité dans les deux autres dimensions. La nouvelle définition proposée de la logistique maintenance permet d'avoir une vision managériale globale et durable portant sur toutes les ressources traitées dans un cadre systémique. La particularité distinguant ce nouveau cadre systémique de la logistique maintenance est la perspective d'activation de ce système et en particulier du sous-système physique (la base de la pyramide) à travers l'organisation de l'environnement logistique de maintenance et surtout à travers l'activation du potentiel humain en exploitant le fruit de l'interaction Homme-Machine (le retour d'expérience résultant) pour la résolution des problèmes de maintenance et la mise en place d'une maintenance améliorative. Cette initiative durable mettant l'accent sur la valorisation du facteur humain, qui sera conçue au niveau stratégique (du sous-système MSMS) et développée au niveau du sous-système d'information et communication de la maintenance (MICS), fera l'objet de notre contribution principale, en rappelant que cette piste de recherche est abordée pour la première fois dans le cadre de cette thèse. Cependant, il s'avère nécessaire de rappeler les différentes pistes managériales définissant les différentes stratégies et politiques de maintenance traçant les traits des modèles managériaux ayant marqué l'évolution des systèmes de production.

IV. Logistique maintenance : définition du cadre managérial

1. Management de la maintenance

Comme définit par la norme européenne EN 13306, Le management de la maintenance est "toutes les activités des instances de direction qui déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités concernant la maintenance et qui les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance, l'amélioration des méthodes dans l'entreprise y compris dans les aspects économiques" [26].

Le management de la maintenance constitue une thématique de recherche d'actualité à laquelle est accordée plus d'intérêt ces dernières années. Récemment cette discipline focalise l'attention sur le rôle de la maintenance comme contributeur à la valeur d'une structure industrielle [43].

Avant la révolution industrielle, la maintenance corrective était le seul besoin d'une production de champs rétrécit à l'échelle artisanale. C'est à l'initiation de la production de masse que le besoin des programmes de maintenance préventive a été exprimé dans le but d'améliorer la qualité des processus et des équipements requis pour délivrer des produits conformes en grandes quantités [48].

A l'époque de l'automatisation, les couts élevés de la maintenance estimés entre 15% à 40% étaient suffisant pour alerter les responsables maintenance et attirer leur attention plus à la notion de management de la maintenance [46]. Effectivement la vérité d'élévation des coûts face à une efficacité insuffisante des activités de maintenance a été considérée une barrière devant l'optimisation des coûts en termes de management [47]. Ainsi les systèmes de production ont montré plus de conscience de la rigidité et la non efficacité du déploiement de la TBM (time based maintenance) ou la maintenance systématique seule, comme l'ont décrit Macchi, et al, pour avoir recours aux techniques de diagnostique introduisant les premiers signes de changement avec les programmes de maintenance conditionnelle (CBM : condition based maintenance) [48][49].en premier lieu cette politique a été fondée sur des aspects techniques qui s'intéressent principalement aux mesurage des paramètres physiques comme symptômes de dégradation faisant appel aux fameux méthodes de contrôle non destructifs : l'analyse vibratoire, l'analyse des huiles, la thermographie ect [48], traçant ainsi les traits techniques d'une maintenance appelée «prédictive » qui reste plus exploitée dans certains secteurs d'activité plus que dans d'autres. Les modèles de maintenance actuels exigent plus qu'une maintenance au sens technique propre réfléchissant à des modèles prenant en considération à la fois les aspects techniques et managériaux [50]. Actuellement, comme l'ont rapporté les auteurs Rausand , Auja et Khamba, Macchi, et al, deux histoires de réussite dans deux secteurs industriels sont à la l'origine de deux méthodologies répandues la MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité) et la TPM (Total Productive Maintenance) [48][51][52].

La vision qui comptait la maintenance une source de coûts inévitables a évolué par la suite vers une perspective entrepreneuriale générale avouant le rôle stratégique de la maintenance ciblant une efficacité technique et financière résultant d'une approche multidisciplinaire qui se base sur une vision stratégique à long terme [44][45]. Cette perspective s'est orientée aujourd'hui vers le concept de création de valeur en considérant la maintenance une source de création de valeur et une clé d'amélioration des performances au sein de l'entreprise [43].

En management de la maintenance, le terme modèle a été souvent utilisé pour décrire une maintenance qui se base sur le déploiement de l'une des politiques ou stratégies ou la combinaison de plusieurs. Dans une étude des modèles existants Fraser a identifié 37 modèles entre 1995-2010, finissant par témoigner la

relevance et l'émergence de quatre modèles : la TPM, la maintenance conditionnelle (CBM), la maintenance basée sur la fiabilité (MBF /RCM), et la maintenance corrective (CM).[53]

2. Stratégies /politiques de Maintenance

La maintenance est une fonction de rôle vital au sein d'un système de production assurant le maintien de ce système en conditions opérationnelles, le choix entre les politiques et stratégies de maintenance ainsi que leur déploiement constitue une préoccupation prioritaire en management de la maintenance. Dans la littérature trois politiques principales ont été citées : la maintenance corrective, la maintenance préventive et la maintenance prédictive [54]. Une quatrième a été également citée « la maintenance mixte » [55]. Comme nommées par Swason « stratégies », les trois premières ont été regroupées en deux types : la stratégie réactive et la stratégie proactive (la maintenance préventive et prédictive) il a aussi mentionné un troisième type : la stratégie agressive (la TPM) [56]. Rasovska différencie entre la politique et la stratégie de maintenance en reliant la politique aux méthodes de management déployées pour atteindre les objectifs et la stratégie au type ou types de maintenance choisie pour un équipement. À son tour, elle a cité en plus des stratégies précédentes la maintenance basée sur le risque MBR, le maintien en conditions opérationnelles ou le benchmarking et la maintenance en conception [57]. Parmi les stratégies de maintenance les plus pratiqué pendant les derniers décennies la MBF et la TPM.

2.1. La MBF

La MBF a été développée pour la première fois dans le secteur de l'aviation américaine par United Airlines en 1978, les programmes MBF visent l'atteinte des capabilités de sécurité et de sureté intrinsèques des équipements à moindre coût [58]. Avant qu'elle soit généralisée, la MBF a été plus implantée en industrie de process alors que la TPM a été plus souvent orienté vers le secteur manufacturier, étant toutes les deux actuellement considérées complémentaires [59][57]. La MBF peut être implantée dans tous les secteurs industriels. Cependant, elle est plus adéquatement adoptée et mise en œuvre lorsque les enjeux des coûts de maintenance ou de sécurité sont importants, à titre d'exemple, actuellement, elle est plus souvent pratiquée dans la production d'énergie, ainsi que dans l'aéronautique, l'agroalimentaire, la pharmacie, ou encore, l'armement [60].

Le processus d'implantation de La MBF se base sur huit étapes [60]:

1-Découpage de l'équipement

2-Sélection des systèmes ou composants selon les enjeux relatifs aux coûts de maintenance, conséquences sur la production et disponibilité du système

3-Identification des systèmes ou des sous-systèmes

4-Précision des défaillances possibles pour chaque fonction

5-Hiérarchisation des criticités et des modes de défaillance (utilisation de la méthode AMDEC)

6-Identification du matériel critique et des causes (mécanisme de dégradation)

7-Sélection des tâches de maintenance et de leur périodicité

8-Rédaction des procédures de maintenance et du plan de formation et mise en œuvre (ou mise à jour des procédures existantes)

Les modèles de management de la maintenance identifiés dans la majorité des papiers de la littérature se réfèrent au même concept à travers les termes : stratégies de maintenance, politiques et méthodes.[53]

L'implantation de la MBF nécessite en premier lieu la formation d'une équipe pilote qui veille sur l'ensemble de ses étapes qui se résume par le processus de la figure 17. La sélection des postes critiques se faits sur la base des critères de sécurité de disponibilité et de maintenabilité.

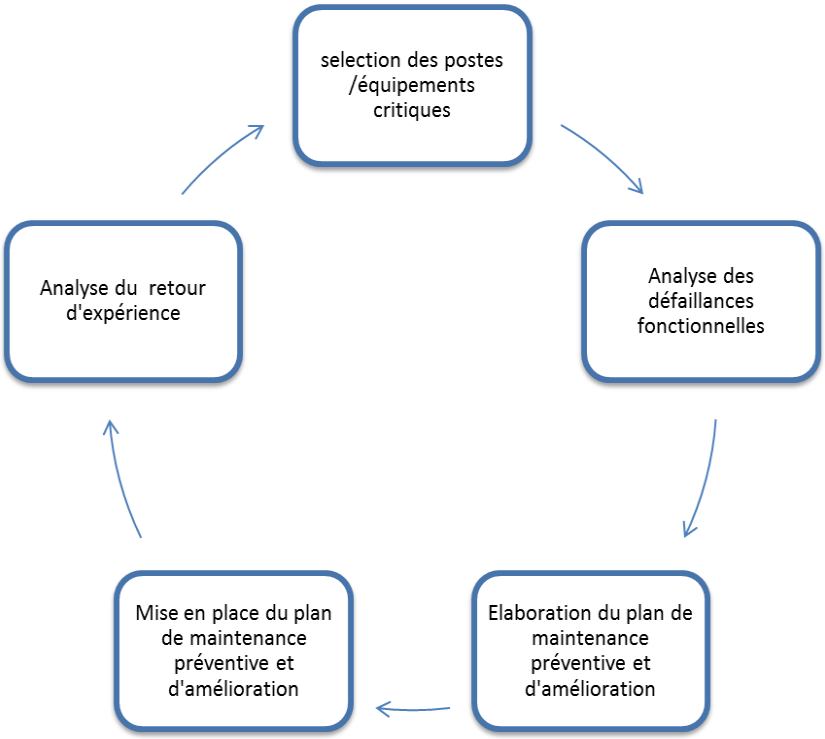


Figure 17. Processus d'implantation de la MBF.

La phase analyse des défaillances fonctionnelle peut exploiter plusieurs méthodes pour remonter aux causes des défaillances ainsi que pour les analyser tel que la méthode AMDEC, Pareto..., sans négliger l'importance du retour d'expérience dans cette phase d'analyse, aussi bien dans l'identification et sélection des équipements ou postes critiques que dans le choix des actions de maintenance préventives et d'amélioration.

2.2. La TPM

En décomposant le mot maintenance productive totale on en déduit sa signification [63] :

Maintenance : c'est le maintien en bonne conditions de façon autonome par l'opérateur de production en assurant les tâches de réparation, nettoyage, graissage et acceptant d'accorder à l'équipement tout le temps requis pour les réaliser.

Productive : tout en produisant ou en réduisant au maximum les problèmes pénalisant la production.

Totale : considérer tous les aspects et y associer tout le monde de la base opératrice au top de la pyramide managériale.

Cette méthode (TPM) d'origine japonaise a été mise en place par la société Nippon Denso dans les années 1970 avec l'aide du cabinet JMA (Japan Management Association) et qui a été formalisée par Seïchi Nakajima (directeur de JIPM, Japan Institute of Plan Maintenance). "C'est un véritable projet d'entreprise qui prend en compte les aspects techniques, organisationnels et surtout humains" [61]. La TPM constitue évolution des méthodes précédentes du monde industriel américain, c'est une transition du cadre classique de la maintenance préventive (PM) à une version plus interactive née au Japon pour intégrer la vision participative en impliquant les opérateurs.

Afin de garantir le succès dans un marché de fortes exigences, la TPM est considérée la démarche la plus prometteuse pour l'amélioration des performances [64]. Effectivement, cette méthode, qui ciblait l'amélioration du fonctionnement des équipements à travers l'amélioration de la fiabilité et la disponibilité, a connu une extension dans l'industrie mondiale pour être considérée, de nos jours, une démarche de management performante dénommée par certains « terotechnologie » [61],

C'est un programme de management de la maintenance visant l'élimination des temps d'arrêts des équipements. Or, la TPM dépasse le cadre classique d'une politique spécifique de maintenance pour être une culture, une philosophie ou encore une aptitude de la maintenance [65**].** L'amélioration de la performance opérationnelle globale est devenue l'objectif principal de la TPM commençant par les améliorations graduelles de la qualité, la maintenance productive...jusqu'à l'harmonisation des équipements de la technologie avancée avec les employés [62]. Comme énoncé par Nakajima « *Créons des petits groupes pour s'approprier les équipements et améliorer leur rendement* » Gatti dénonce ce qui a décrit par le schéma basique « moi je produis, toi tu répares » pour rendre la maintenance « l'affaire de tous » en confiants aux utilisateurs de la machine les tâches de maintenance du premier niveau [61].

Il est témoigné que l'implantation de la TPM n'est pas un défi à court terme (allant de 3 à 5ans) [15**],** vue la nécessité de l'implication collective du facteur humain. Effectivement, c'est un processus complexe à long terme qui doit être transmis aux opérateurs en tant qu'une méthodologie d'amélioration légitime » en se basant sur six éléments clés pour une implantation réussie [65]:

- Améliorer l'efficacité de l'équipement ciblant les pertes majeures
- Impliquer les opérateurs au quotidien dans le maintien systématique de leurs équipements
- Améliorer l'efficience et l'efficacité de la maintenance

- Former toute personne impliquée
- Gérer le cycle de vie de l'équipement et intégrer la maintenance préventive en conception
- Chercher le gain auprès d'une équipe concentrée sur des objectifs communs.

L'implantation de la TPM se base sur huit piliers [64]

- Pilier 1: maintenance autonome
- Pilier 2: amélioration au cas par cas
- Pilier 3: maintenance planifiée
- Pilier 4: amélioration du savoir-faire et des connaissances
- Pilier 5: maîtrise de la conception
- Pilier 6: maîtrise de la qualité
- Pilier 7: application de la TPM dans les bureaux
- Pilier 8: sécurité et environnement

La TPM ciblant l'amélioration de l'efficacité maximale de production s'appuie principalement sur l'outil 5S pour l'amélioration des conditions de travail comme le montre la conception de la maison TPM.

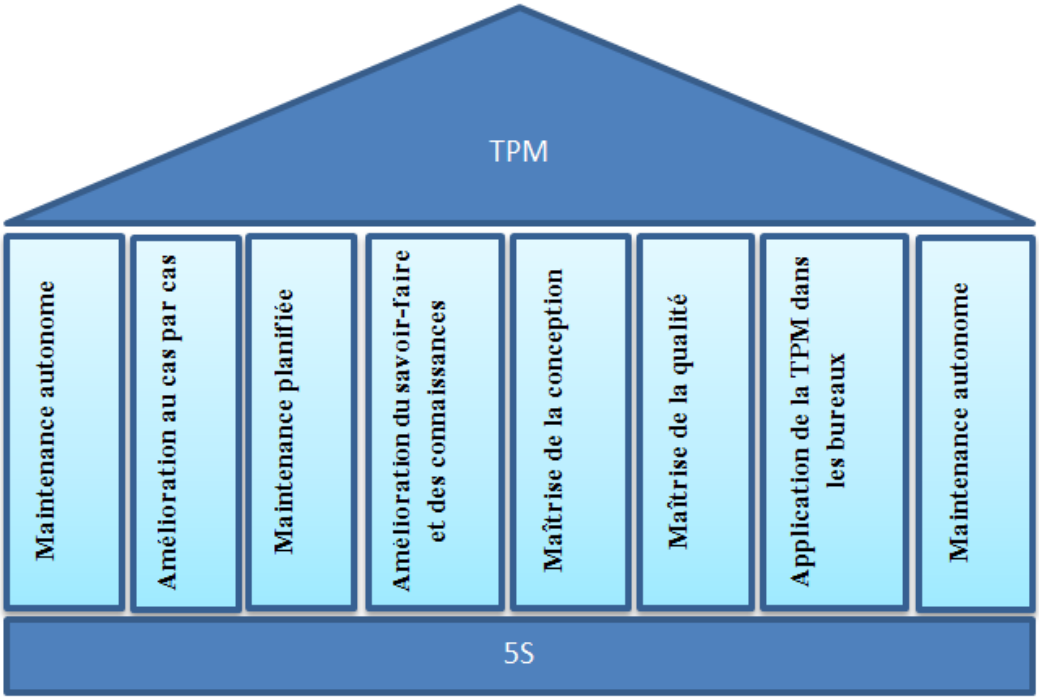


Figure 18. L'approche 8 piliers pour l'implantation de la TPM (proposé par JIPM) [52].

La TPM a recours à plusieurs outils pour l'analyse et la résolution de problèmes liés aux équipements et aux processus tel que l'analyse Pareto, les techniques de résolutions de problèmes le diagramme causes à effets, le Brainstorming, les 5S, la maintenance autonome et l'amélioration continue [66].

3. Synthèse

Le management de la maintenance est un concept qui a connu une évolution significative dépassant les activités de maintenance de base centrées sur la mise en place des politiques de maintenance de façon générale pour avoir des réflexions plus détaillées pensant aux choix des stratégies optimales de maintenance, aux outils méthodiques. Néanmoins, la littérature montre encore l'absence d'un cadre générique et méthodique exprimant le besoin d'une culture managériale à adopter concrétisée à travers des standards méthodologies pratique. Effectivement, le fait de développer et mettre en œuvre un concept de maintenance est un processus difficile qui peut rencontrer de nombreux problèmes comme l'absence d'une méthodologie systématique et cohérente, c'est-à-dire le manque d'un cadre de travail [45]. L'aspect pratique aussi de ce cadre s'avère manquant comme l'a conclu Fraser à l'issue d'une revue des modèles de management de la maintenance affirmant qu'un intérêt plus important doit être accordé à l'aspect pratique [53].

Quoique la MBF permet de fournir un classement au préalable des machines à traiter selon les critères de sécurité, disponibilité et maintenabilité, L'équipe d'implantation de la MBF est souvent constituée d'un nombre limité de techniciens et de leurs responsables hiérarchiques dont l'opérateur de production trouve rarement sa place. La MBF ne tient pas compte des temps d'arrêts, cette notion de temps qui s'avère décisive et cruciale pour la fonction maintenance, rend la vision de la méthode incomplète et éloignée des mesures de flexibilité et agilité en termes d'analyse et prise de décision.

Les stratégies de maintenance abordées dans la littérature se caractérisent par une vision hiérarchique dans la prise de décisions en maintenance. Le contexte industriel de nos jours impose plus de contraintes en absence d'une vision managériale globale impliquant le facteur humain de façon collective et valorisante, témoignant le besoin d'activer ce potentiel que la réalité de terrain montre qu'il reste encore inexploité malgré les tentatives inachevées d'implantation de la TPM.

4. Conclusion

L'implantation réussie de toute stratégie de maintenance ne peut aboutir à ses objectifs sans une implication collective du facteur humain. La TPM est la stratégie ciblant une meilleure disponibilité des machines via une amélioration graduelle et visant aussi une "autonomation" à travers l'autonomisation de l'opérateur et son implication ainsi qu'à travers le recours à la technologie. Ces deux concepts importants du TPS sont les concepts marquant de la philosophie lean. En logistique maintenance l'aspect technologique se traduit par des équipements de haute technologie, un outillage et des appareils de test plus sophistiqué... Cependant le facteur humain, faisant partie du sous-système physique du système logistique maintenance, reste inactivé vue la difficulté d'implication et d'autonomisation des opérateurs (en particuliers les opérateurs de production) demeurant encore le point freinant les tentatives d'amélioration en maintenance

ou encore freinant la pratique du Kaizen en maintenance. Ce qui nous renvoie à analyser de près les pratiques managériales de maintenance déployées au niveau du sous-système physique via une étude empirique détaillée au chapitre suivant.

Chapitre 3. Le management de la maintenance : étude empirique

I. Cadre de l'étude

Cette étude a pour objectif de dresser un cadre empirique pour notre travail de recherche permettant de rassembler le maximum d'information sur les perceptions managériales et stratégies conçu au niveau du sous-système de management stratégique de la maintenance ainsi que sur les pratiques de la maintenance au niveau du sous-système d'information et de communication et sous-système physique de la maintenance dans le cadre du système logistique maintenance. Dans l'optique spécifique d'évaluer le niveau d'implication du facteur humain (l'opérateur de production en particulier) dans la résolution des problèmes liés aux équipements, nous avons mené une enquête de terrain en se basant sur les réponses collectées de 152 questionnaires après avoir adressé 281 questionnaires aux systèmes de productions industriels de différents secteurs d'activité au Maroc, ce qui se traduit par un taux de réponse de 54.09%. Les résultats de cette étude ont fait l'objet de deux publications [157] [158].

Nous avons diversifié les modalités de collecte des réponses. 34,87% des questionnaires ont été adressés via des entretiens directs, 39,85% en les envoyant par email et 25,28% à travers une personne intermédiaire.

II. Analyse des résultats des questionnaires

Toute l'analyse qui suit a été effectuée sur le logiciel SPSS (Statistical Package for Social Sciences) qui est un logiciel d'analyse statistique développé par l'entreprise SPSS inc et revendu par IBM qui a racheté l'entreprise créatrice du logiciel en 2009. SPSS est actuellement l'un des logiciels les plus utilisé pour l'analyse statistique dans divers domaines. Les entreprises enquêtées sont de différentes tailles (petite, moyenne et grande), comme le montre le graphique de la figure 19.

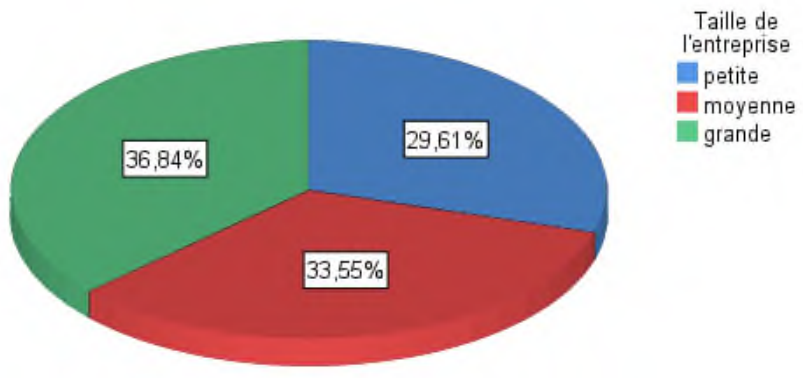


Figure 19. Répartition de l'échantillon selon la taille d'entreprise.

Dans l'objectif d'avoir une vision plus générique et rapprochée de l'environnement industriel, nous avons contacté des entreprises de différents secteurs d'activités. Les réponses collectées des différents secteurs d'activités sont réparties selon le graphique de la figure 20.

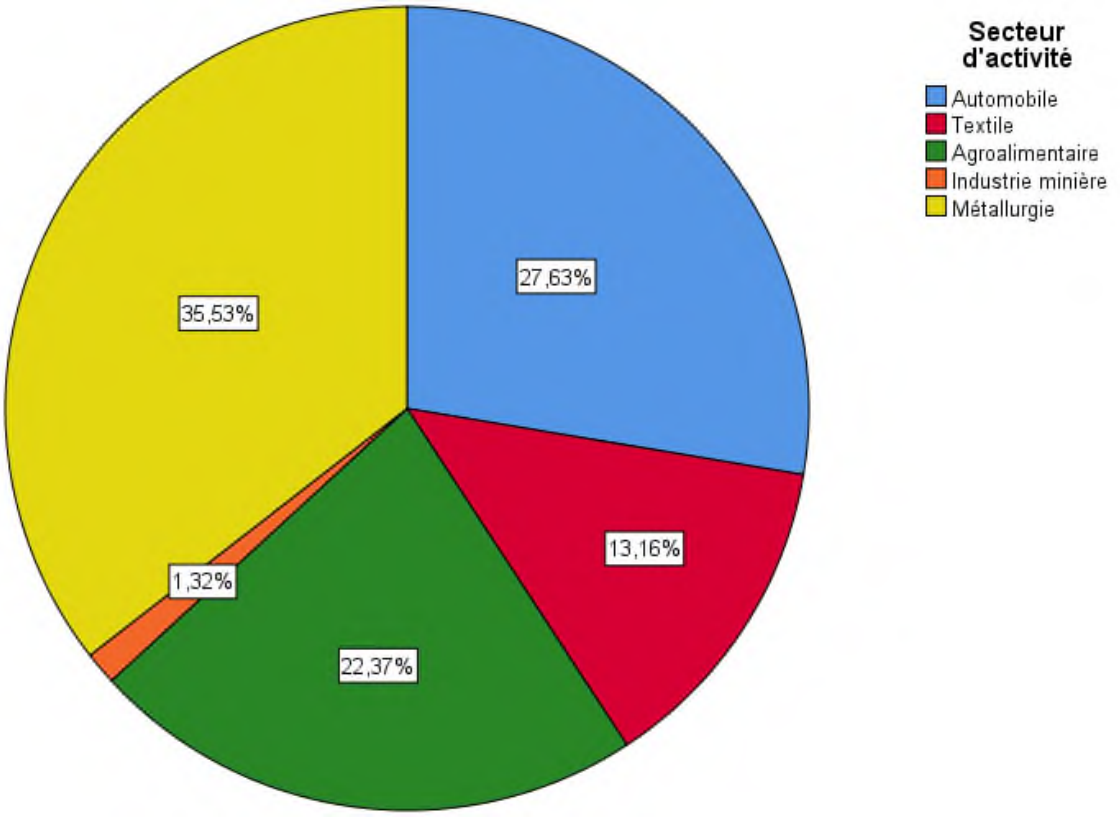


Figure 20. Répartition de l'échantillon selon le secteur d'activité.

1. Niveau de communication entre le service maintenance et les autres services

Afin d'évaluer l'aspect de communication du service maintenance nous avons demandé aux différentes entreprises de l'échantillon de répondre à des questions précises permettant de mesurer le niveau de communication et coordination, d'une part, entre le service maintenance et les autres services, plus particulièrement entre le service maintenance et l'opérateur de production (qui sera traité dans le paragraphe suivant).

Pour évaluer ce niveau, nous avons premièrement posé la question :

Comment évaluez-vous le niveau de communication entre le département/service maintenance et les autres services ?

Les réponses sous forme de choix entre 5 niveaux (pas du tout satisfaisant ; peu satisfaisant ; plus ou moins satisfaisant ; satisfaisant ; très satisfaisant) sont réparties selon le graphique de la figure 21.

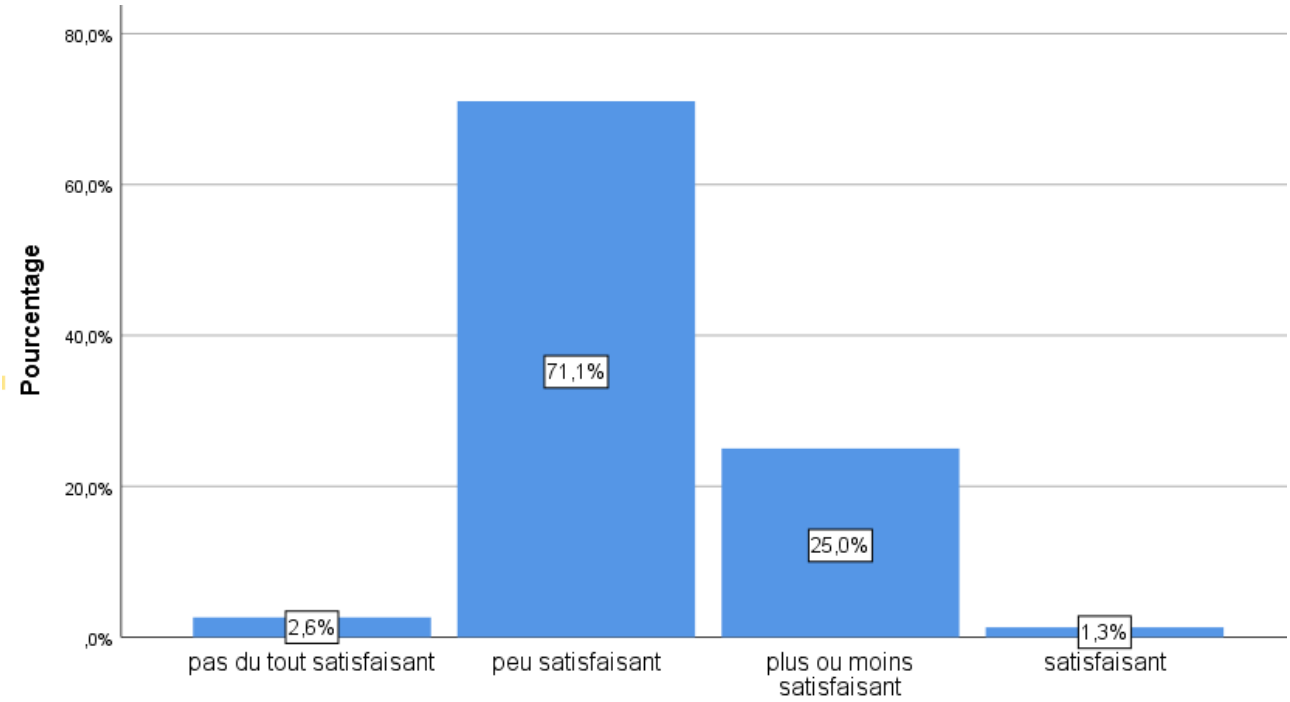


Figure 21. Niveau de communication entre le département/service maintenance et les autres services.

71% des réponses admettent que le niveau de communication entre le service maintenance et les autres services de l'entreprise (en particulier le service /département production) est encore peu satisfaisant. Nous nous intéressons en particulier à l'évaluation de la communication et collaboration entre le service maintenance et l'opérateur de production. Dans cette perspective, on a ciblé l'évaluation du niveau d'implication de l'opérateur de production dans la résolution des problèmes en maintenance.

2. Niveau d'implication de l'opérateur de production dans la résolution de problèmes liées aux équipements

Dans le but d'évaluer le niveau d'implication de l'opérateur de production dans la résolution de problèmes liés aux équipements, on a conçu une échelle globale de trois éléments (3 questions) dont chacun est évalué à travers une échelle Likert à cinq points (5 niveaux) comme détaillé dans le tableau 5.

Tableau 5. Echelle d'évaluation du niveau d'implication de l'opérateur de production dans la résolution de problèmes liés aux équipements.

Elément	Variable d'évaluation	Question	Echelle de l'élément
1-Implication de l'opérateur de production dans la détection des défaillances.	Fréquence de déclaration des défaillances.	**À quelle fréquence l'opérateur de production déclare l'occurrence des défaillances au bon moment ?**	**Echelle Likert à 5 niveaux :** Jamais, Rarement, Quelquefois, Souvent, Systématiquement/ toujours.
2-Implication de l'opérateur de production dans la proposition de solution en maintenance.	Fréquence de proposition de solutions aux problèmes liés aux équipements	**À quelle fréquence l'opérateur de production propose des solutions aux problèmes liés aux équipements ?**	
3-Implication de l'opérateur de production dans la mise en place de solution aux problèmes liés aux équipements.	Fréquence de participation de l'opérateur de production à la mise en place des propositions d'amélioration et plans de maintenance.	**À quelle fréquence l'opérateur de production participe à la mise en place des améliorations et plans de maintenance pour la résolution de problèmes liés aux équipements ?**	

2.1. Analyse de la fiabilité de l'échelle

Dans la littérature, Plusieurs échelles ont été discutées présentant différents résultats de fiabilité [123] dont les valeurs du coefficient alpha s'étendent entre 0.68 et 0.86 [124] ou encore entre 0.70 et 0.90 [125].

Afin de s'assurer de la fiabilité de l'échelle construite (du Tableau 5), on a mené un test de fiabilité sur le logiciel SPSS, qui nous a fourni un coefficient alpha de Cronbach de 0.715 supérieur à 0.7 (le seuil requis comme définit par Nunnaly [67] et qui est considéré actuellement de large acceptabilité dans la majorité des domaines) ce qui confirme la fiabilité de notre échelle.

Tableau 6. Statistiques de fiabilité.

Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
0,715	0,722	3

Le test de fiabilité nous a fourni les statistiques descriptives de chaque élément : la moyenne et l'écart type. Les moyennes sont presque toutes égales à 3 donc en moyenne les répondants adoptent la même perception concernant les trois éléments mesurant l'implication de l'opérateur de production dans la résolution de problèmes liés aux équipements. Autrement dit les 152 entreprises enquêtées affirment une moyenne d'implication autour de 3 ce qui reflète une implication encore insuffisante dont l'implication à la proposition de solution reste la moins satisfaisante, ce qui reflète un potentiel d'innovation encore timide mettant l'accent sur un opérateur de production insuffisamment impliqué.

Tableau 7. Statistiques d'éléments

Éléments	Moyenne	Ecart type	N
Fréquence de proposition de solutions	2,99	0,661	152
Fréquence de mise en place des propositions/plans	3,02	0,888	152
Fréquence de déclaration de défaillances	3,31	0,739	152

La matrice de corrélation (tableau 8) résumant les résultats de corrélation entre les trois éléments de l'échelle montre un coefficient de corrélation r > 0.4. Ce coefficient représente une corrélation moyenne à forte selon les balises de Cohen affirmant qu'une valeur de r entre 0.3 et 0.49 exprime une corrélation moyenne qui devienne forte entre 0.5 et 1 [90], ce qui assure que ces éléments sont suffisamment corrélés pour considérer qu'ils mesurent tous le même construit (implication de l'opérateur de production dans la résolution des problèmes liées aux équipements).

Tableau 8. Matrice de corrélation inter-éléments.

	Fréquence de proposition de solutions	Fréquence de mise en place des propositions/plans	Fréquence de déclaration de défaillances
Fréquence de proposition de solutions	1,000	0,576	0,402
Fréquence de mise en place des propositions/plans	0,576	1,000	0,415
Fréquence de déclaration de défaillances	0,402	0,415	1,000

Le test réalisé sur SPSS (tableau 9) nous a aussi permis de vérifier la valeur potentielle d'alpha de Cronbach en cas de suppression de l'un des éléments. Les statistiques totales des éléments montrent des valeurs de corrélation supérieures à 0.3 étant le seuil d'acceptabilité [96] [97]. Toutes les valeurs indiquées sont inférieures à 0.715 ce qui justifie la consistance des trois éléments.

Tableau 9. Statistique totale des éléments.

	Moyenne de l'échelle en cas de suppression d'un élément	Variance de l'échelle en cas de suppression d'un élément	Corrélation complète des éléments corrigés	Carré de la corrélation multiple	Alpha de Cronbach en cas de suppression de l'élément
Fréquence de proposition de solutions	6,33	1,878	0,590	0,364	0,579
Fréquence de mise en place des propositions/plans	6,30	1,375	0,586	0,372	0,570
Fréquence de déclaration de défaillances	6,01	1,901	0,460	0,212	0,711

L'analyse statistique de l'échelle réalisée sur SPSS montrant une moyenne de 9.32 ce qui se traduit par une orientation vers la fréquence "quelquefois" expliquant que le niveau d'implication de l'opérateur de production dans la résolution de problèmes liés aux équipements reste encore insuffisant pour répondre aux besoins actuels de l'industrie en termes de collaboration des ressources.

Tableau 10. Statistiques d'échelle

Moyenne	Variance	Ecart type	Nombre d'éléments
9,32	3,383	1,839	3

2.2. Analyse des réponses

- 1er élément : Implication de l'opérateur de production dans la déclaration des défaillances : afin d'évaluer le niveau de cette implication on a posé la question suivante :

À quelle fréquence l'opérateur de production déclare l'occurrence des défaillances au bon moment ?

Les réponses sont récapitulées par le graphique de la figure 22.

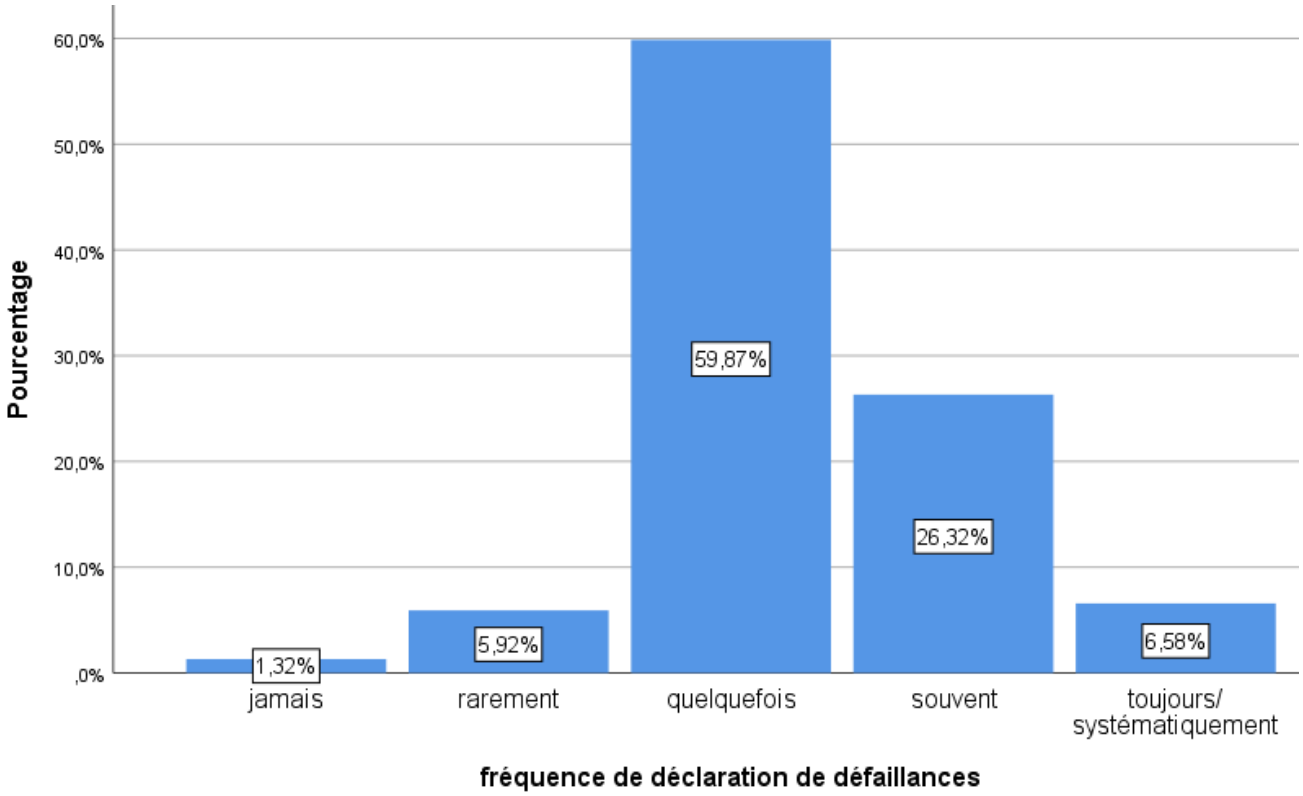


Figure 22. Fréquence de déclaration des défaillances par l'opérateur de production.

59,87% des entreprises enquêtées décrivent la fréquence de déclarations des défaillances par l'opérateur de production en choisissant la réponse "quelquefois", ce qui traduit un niveau de déclaration relativement insuffisant restant loin encore d'une pratique systématique. Par ailleurs, la déclaration des défaillances par l'opérateur de production n'est pas encore traduite en une culture managériale standardisée aux ateliers de production.

- 2ème élément : Implication de l'opérateur de production dans la proposition de solution en maintenance.

Pour évaluer le niveau d'implication de l'opérateur de production dans la proposition de solution la question suivante a été posée : **À quelle fréquence l'opérateur de production propose des solutions aux problèmes liés aux équipements ?** Offrant le choix entre 5 niveaux : Jamais, Rarement, Quelquefois, Souvent, Systématiquement/ toujours.

Les réponses sont représentées dans le graphique de la figure 23.

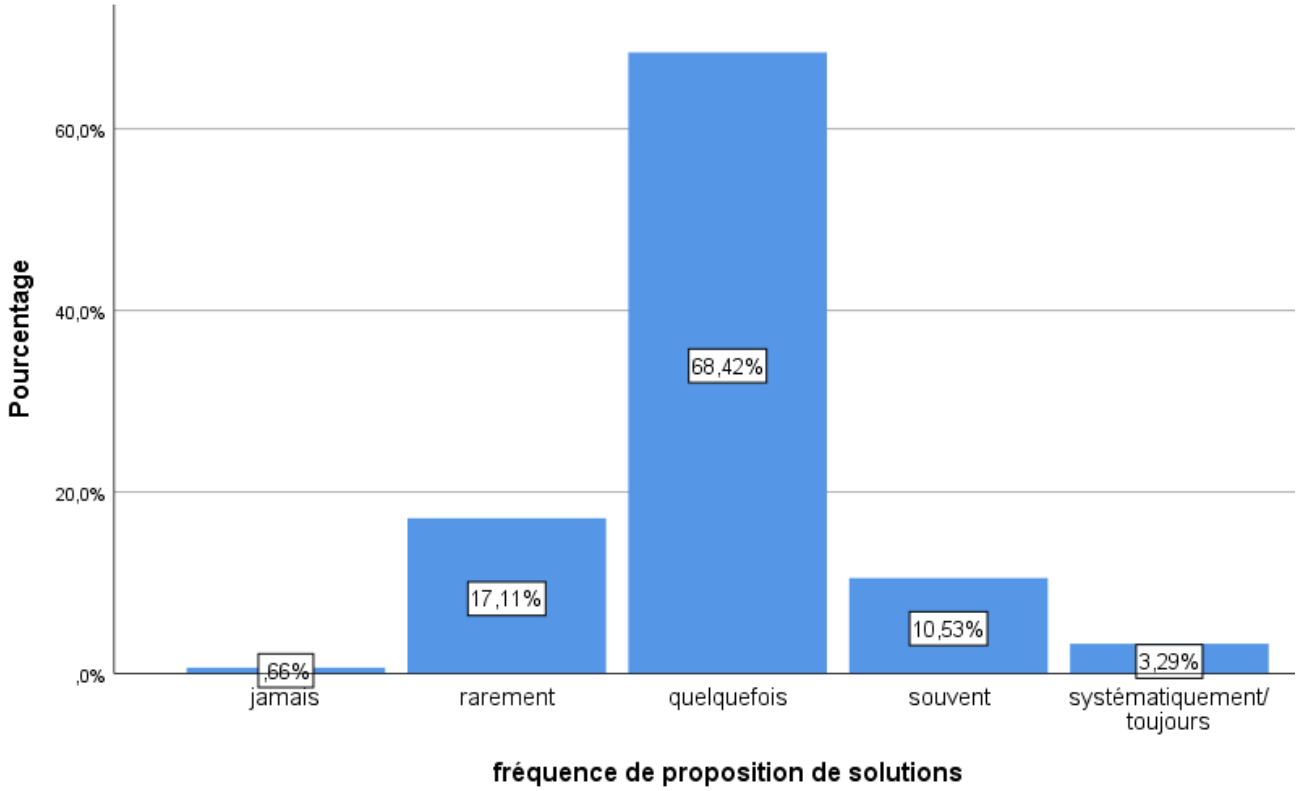


Figure 23. Fréquence de proposition de solutions aux problèmes liés aux équipements par l'opérateur de production.

68.42% des réponses montrent que l'opérateur de production reste encore peu actif en ce qui concerne la proposition de solution aux problèmes liés aux équipements en ne contribuant que quelquefois. En revanche, seulement 10.53% des répondant ont précisé la fréquence "souvent" et 3.29 % des entreprises ont répondu par " systématiquement ou toujours", ce qui assure que la majorité des entreprises ont un faible niveau d'implication de l'opérateur de production dans la proposition de solutions aux problèmes liés aux équipements et que la culture d'innovation et de proposition des solutions reste encore inhabituellement et pauvrement exploitée au milieu industriel. Par conséquent, l'industrie marocaine risque de perdre un large éventail de connaissance inactives et par ce, un grand nombre d'opportunités d'amélioration en maintenance.

- 3ème élément : Implication de l'opérateur de production dans la mise en place de solution aux problèmes liés aux équipements.

Afin d'évaluer le niveau d'implication de l'opérateur de production dans la mise en place des solutions et plan de maintenance on a posé la question : **À quelle fréquence l'opérateur de production participe à la résolution de problèmes liés aux équipements ?** Offrant le choix entre 5 niveaux : Jamais, Rarement, Quelquefois, Souvent, Systématiquement/ toujours.

Les réponses à cette question sont représentées par le graphique de la figure 24.

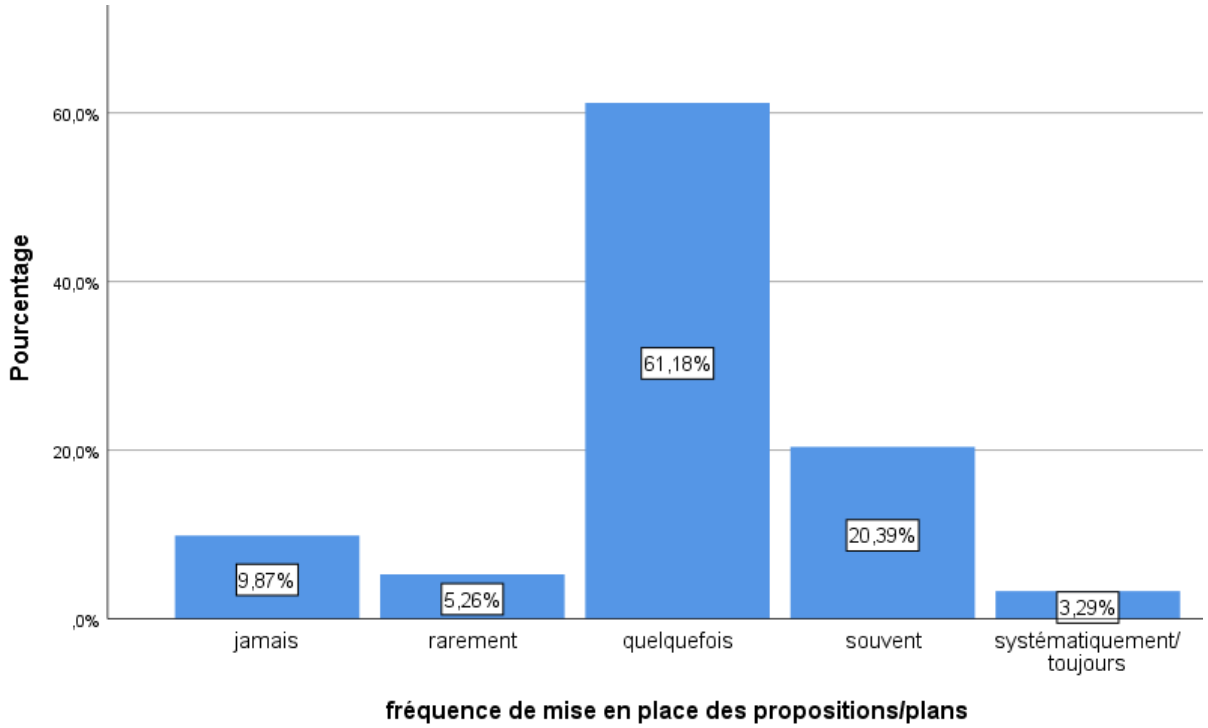


Figure 24. Fréquence de participation de l'opérateur de production à la mise en place des propositions d'amélioration et plans de maintenance.

61.18% des répondants confirment la réalité d'une implication insuffisante de l'opérateur de production dans la mise en place des propositions de solutions ou d'améliorations et des plans de maintenance ce qui nous a souvent été expliqué par l'absence d'un formalisme pratique et efficace permettant une collaboration en temps réelle et par ailleurs un meilleur niveau d'implication de l'opérateur de production.

2.3. Synthèse

L'implication de l'opérateur de production dans la résolution de problèmes liés aux équipements a été effectuée à travers une échelle globale fiable de trois éléments et une échelle de Likert à cinq niveaux pour chacun.

Les résultats analysés témoignent un niveau d'implication qui est encore insatisfaisant par rapport aux trois éléments : la détection, la proposition de solutions ainsi que leur mise en place, illustrée par une majorité de réponses loin du 5ème niveau de l'échelle de Likert. En d'autres termes, l'implication de l'opérateur de production dans la résolution de problème reste encore loin d'une pratique systématique ou quotidienne dans les entreprises et par conséquent loin de la culture de l'entreprise.

3. Organisation de l'environnement logistique de travail et son influence.

3.1. Analyse de fiabilité de l'échelle

Dans l'objectif d'évaluer le niveau d'organisation des moyens et outils de maintenance et son influence sur le déroulement des interventions au sein des systèmes de productions enquêtés, on a construit une échelle fiable de deux éléments à travers deux questions adressées aux responsables maintenance. La fiabilité de l'échelle a été vérifiée via le test d'analyse de fiabilité sur SPSS suite à la démarche abordée dans le paragraphe précédent (pour mesurer le niveau d'implication de l'opérateur de production dans la résolution des problèmes liés aux équipements). Cette fiabilité se justifie par un alpha de Cronbach de 0.722.

Tableau 11. Statistique de fiabilité de l'échelle relative à l'organisation de l'environnement logistique de travail.

Statistiques de fiabilité	
Alpha de Cronbach	Nombre d'éléments
0,722	2

3.2. Analyse des réponses

- 1er Elément : Niveau d'organisation de l'outillage et stocks de maintenance

Pour évaluer le niveau d'organisation de l'outillage de maintenance, outils ou moyens nécessaires aux différentes interventions et activités de maintenance, on a posé la question :

A quel degré l'outillage, les outils et moyens de maintenance sont organisés ?

Offrant le choix entre 5 niveaux : Très bien organisés, Bien organisés, Plus ou moins organisés, Peu organisés et Très peu organisés, les réponses décrivant ce niveau sont représentées par le graphique de la figure 25.

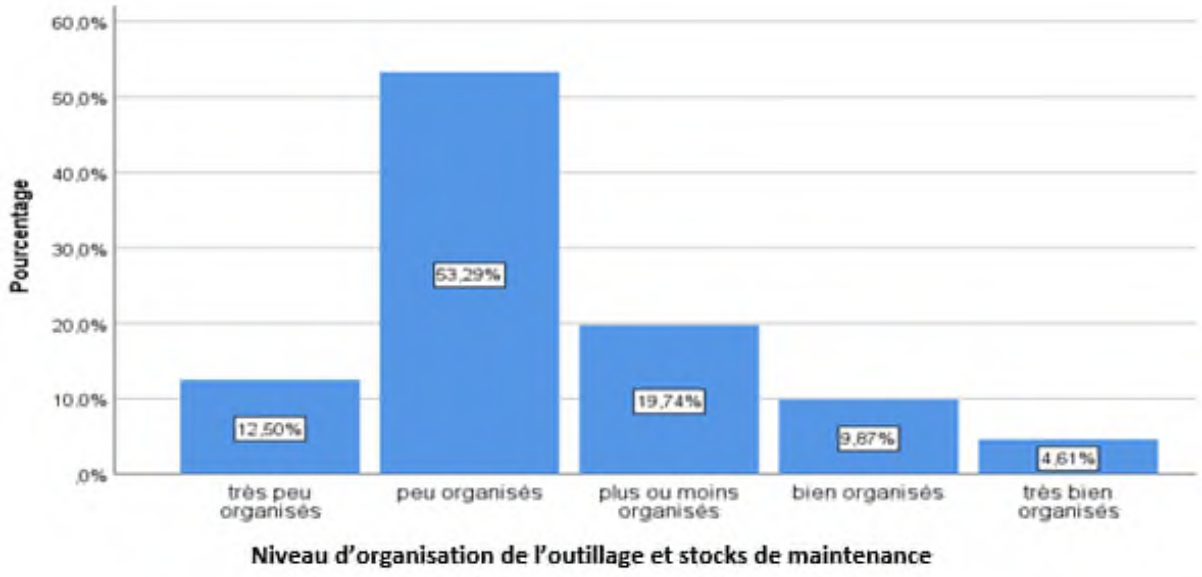


Figure 25. Niveau d'organisation de l'outillage et stocks de maintenance.

53,29% des répondants attestent que l'outillage et stocks de maintenance restent peu organisés et nécessitent une meilleure organisation ou une réorganisation afin de maitriser l'environnement de travail influent sur le rendement des opérateurs.

- 2ème Elément : Niveau d'influence d'organisation de l'outillage et stock de maintenance

Dans l'intention d'évaluer cette influence, on a posé la question suivante aux responsables maintenance **à quel degré l'organisation de l'outillage, ou stocks de maintenance en général influe sur le temps de recherche d'un outil et par conséquent sur la flexibilité de déroulement des interventions ?** Offrant le choix entre les cinq niveaux : Très influent, Influent, Moyennement influent, Peu influent, Presque pas d'influence.

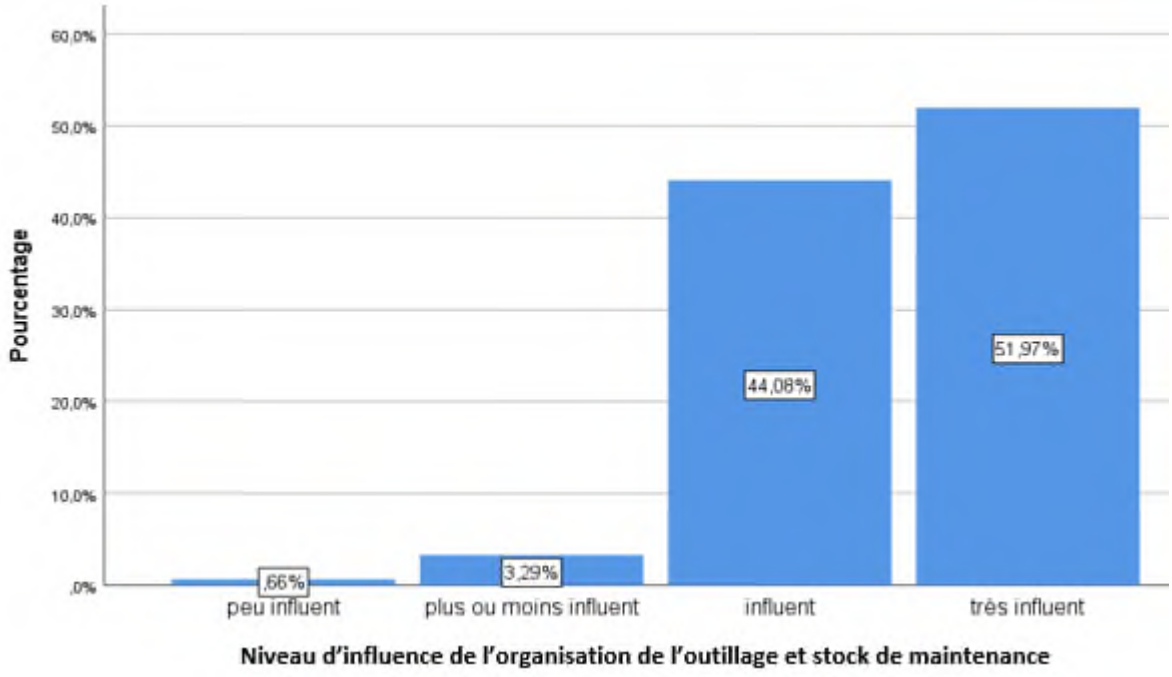


Figure 26. Niveau d'influence de l'organisation de l'outillage et stock de maintenance sur le déroulement des interventions.

96.05% des réponses se situent entre influent (44.08%) et très influent (51,97%) décrivant le niveau d'influence d'organisation de l'outillage et du stock de la maintenance confirmant ainsi l'importance d'une organisation efficace des stocks et locaux de maintenance permettant la diminution du temps de recherche des outils ou d'un élément du stock de maintenance en général.

4. L'impact de l'implantation du Lean en logistique maintenance

4.1. Analyse de fiabilité de l'échelle

Dans l'optique d'évaluer l'impact d'implantation du lean en logistique maintenance, on a conçu une échelle fiable de quatre éléments en posant quatre questions. L'analyse de fiabilité de l'échelle a été menée sur SPSS et justifiée par un alpha de Cronbach de 0.802 comme le montre le Tableau 12.

Tableau 12. Statistique de fiabilité de l'échelle relative à l'impact du lean en logistique maintenance.

Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
0,802	0,801	4

Afin de prévoir l'impact du lean sur l'environnement logistique de travail et mesurer le niveau de conscience des responsables maintenance de cet impact sur la culture du facteur humain ainsi que sur le coût et temps de la maintenance, on a posé la question **A quel niveau jugez-vous bénéfique l'implantation du lean en logistique maintenance ?** Offrant le choix entre 5 niveaux sur une échelle de Likert (pas du tout bénéfique, peu bénéfique, plus ou moins bénéfique, bénéfique, très bénéfique) pour chaque champs impactés (l'environnement logistique de travail, la culture du facteur humain, le coût de maintenance et le temps de maintenance). Ainsi les réponses sont collectées pour les quatre éléments de notre échelle :

- 1er Elément : dont la variable d'évaluation est intitulée "environnement logistique de travail" représentant l'impact du lean sur l'environnement logistique de travail.
- 2ème Elément : dont la variable d'évaluation est intitulée "culture du facteur humain" représentant l'impact du lean sur la culture du facteur humain.
- 3ème Elément : dont la variable d'évaluation est intitulée "impact du lean sur le coût de maintenance.
- 4ème Elément : représente l'impact du lean sur le temps de maintenance.

Le test de fiabilité nous a fourni les statistiques descriptives de chaque élément : la moyenne et l'écart type. Les moyennes sont toutes très rapprochées autour de 4 donc en moyenne les répondants adoptent la même perception admettant l'impact positive du lean en cas de son implantation en logistique maintenance par rapport à chacun des éléments.

Tableau 13. Statistiques des éléments de l'échelle relative à l'impact du lean en logistique maintenance

	Moyenne	Ecart type	N
Culture du facteur humain	4,06	0,915	152
L'environnement logistique de travail	4,66	0,736	152
Coût de la maintenance	4,10	0,890	152
Le temps de maintenance	4,21	0,777	152

La matrice de corrélation appui le fait que tous les éléments de l'échelle mesurent le même construit « impact du lean en logistique maintenance » étant suffisamment corrélés.

Tableau 14. Matrice de corrélation inter-éléments mesurant l'impact du lean.

	Culture du facteur humain	L'environnement logistique de travail	Coût de la maintenance	Le temps de maintenance
Culture du facteur humain	1,000	0,393	0,806	0,336
L'environnement logistique de travail	0,393	1,000	0,395	0,610
Coût de la maintenance	0,806	0,395	1,000	0,468
Le temps de maintenance	0,336	,610	,468	1,000

Le test réalisé sur SPSS (du Tableau 15) nous a aussi permis de vérifier la valeur potentielle d'alpha de Cronbach en cas de suppression de l'un des éléments. Toutes les valeurs indiquées sont inférieures à 0.802 ce qui justifie la consistance des quatre éléments.

Tableau 15. Statistique totale des éléments mesurant l'impact du lean.

	Moyenne de l'échelle en cas de suppression d'un élément	Variance de l'échelle en cas de suppression d'un élément	Corrélation complète des éléments corrigés	Carré de la corrélation multiple	Alpha de Cronbach en cas de suppression de l'élément
Culture du facteur humain	12,97	3,801	0,650	0,668	0,735
L'environnement logistique de travail	12,37	4,671	0,548	0,415	0,783
Coût de la maintenance	12,93	3,691	0,724	0,695	0,694
Le temps de maintenance	12,82	4,531	0,551	0,451	0,781

Les statistiques de l'échelle (du tableau 16) montrent une moyenne de 17.03 assurant que les répondants prévoient l'impact bénéfique du lean en logistique maintenance (par rapport à tous les éléments) en le qualifiant par "bénéfique" (4ème niveau de l'échelle de Likert).

Tableau 16. Statistiques de l'échelle mesurant l'impact du lean.

Moyenne	Variance	Ecart type	Nombre d'éléments
17,03	6.959	2,638	4

4.2. Classement des éléments

En classant ses éléments selon leurs moyennes comme le montre le tableau 17, on remarque que toutes les moyennes indiquent la même constatation de l'impact bénéfique du lean par rapport à tous les éléments ou champs dont la culture du facteur humain reste la 4ème du classement, ce qui s'explique par un recul relatif introduisant la difficulté d'implantation du lean en logistique maintenance en absence d'un niveau d'implication suffisant. En investiguant plus loin lors de nos entretiens avec les responsables maintenance, on nous a signalé la difficulté de collaboration avec l'opérateur et en particulier l'opérateur de production restant la contrainte freinant les alternatives d'implantation du lean et toute démarche d'amélioration au sein des systèmes de productions et dans le terrain de la maintenance en particulier.

Tableau 17. Classement des champs bénéficiant de l'implantation du lean.

	Moyenne	Ecart type	Ordre de Classement
Culture du facteur humain	4,06	0,915	4
L'environnement logistique de travail	4,66	0,736	1
Coût de la maintenance	4,10	0,890	3
Le temps de maintenance	4,21	0,777	2

4.3. Synthèse

La majorité des réponses juge bénéfique l'impact du lean en logistique maintenance sur les quatre champs abordés précédemment, avec une orientation vers le 4ème niveau de l'échelle de Likert « bénéfique ». Néanmoins, la difficulté de changement ou d'adaptation de la culture du facteur humain se manifestant par le classement de ce champ comme le 4ème (dernier) des champs impactés justifié par la contrainte de collaboration avec les opérateurs et les opérateurs de production en particulier.

5. Positionnement du retour d'expérience par rapport au système d'information et de communication de la maintenance.

5.1. Collecte du feedback de l'opérateur de production

Afin de situer le problème de collaboration avec le facteur humain à l'échelle opérationnelle et dans une alternative de positionnement du retour d'expérience au sein des systèmes de productions marocains, nous avons adressé la question suivante aux responsables maintenance des entreprises enquêtées :

A quelle fréquence collectez-vous le feedback des opérateurs de production pour résoudre les problèmes de maintenance ? Les répondants ont choisi l'un des adverbes de fréquences suivant :

- Toujours/ systématiquement
- Souvent
- Quelques fois
- Rarement
- Jamais

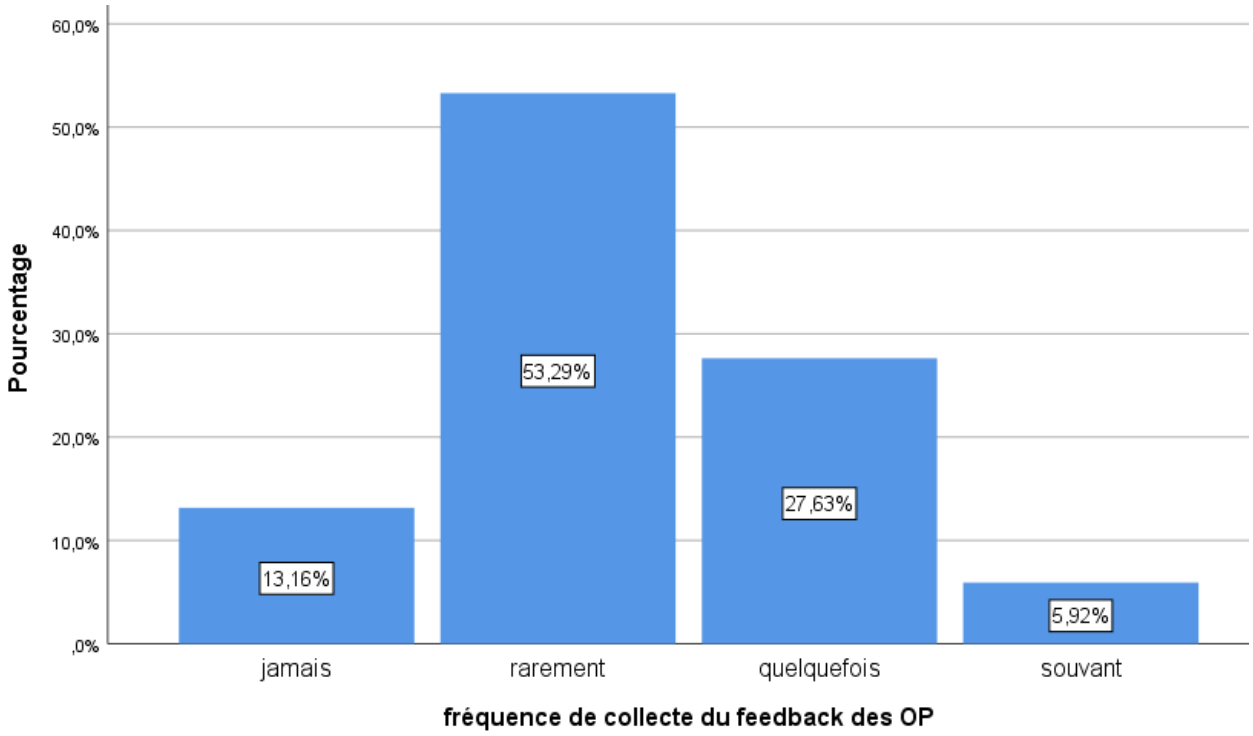


Figure 27. Fréquence de collecte du feedback des opérateurs de production.

53.29% des systèmes de production enquêtés ont qualifié de rare la collecte des feedbacks des opérateurs de production pour la résolution des problèmes liés aux équipements tandis que 13.16% affirment qu'il ne collecte jamais ce feedback et 27.63% ne le font que quelquefois. Ces répondants constituent un pourcentage de 94.08% qui n'adoptent pas la collecte du feedback des opérateurs de production dans leurs stratégies ou pratiques de maintenance témoignant une minorité de 5,92% qui a répondu par « souvent » alors que personne de nos répondant n'a choisi la fréquence « systématiquement » ce qui confirme encore le fait que la collecte de ce feedback est encore loin de la culture managériale en maintenance des systèmes de production.

5.2. Importance de l'intégration du retour d'expérience de l'opérateur de production

Dans la perspective d'évaluer la conscience des responsables maintenance de l'importance de l'intégration du retour d'expérience des opérateurs de production dans la résolution de problèmes liés aux équipements, on leurs a adressé la question :

A quel point jugez-vous importante l'intégration du retour d'expérience des opérateurs de production dans la résolution des problèmes liés aux équipements ?

Pour répondre à cette question on a proposé de choisir parmi cinq points sur une échelle de Likert allant de « sans importance » jusqu'à « très importante ».

Les réponses collectées sont représentées par la figure 28.

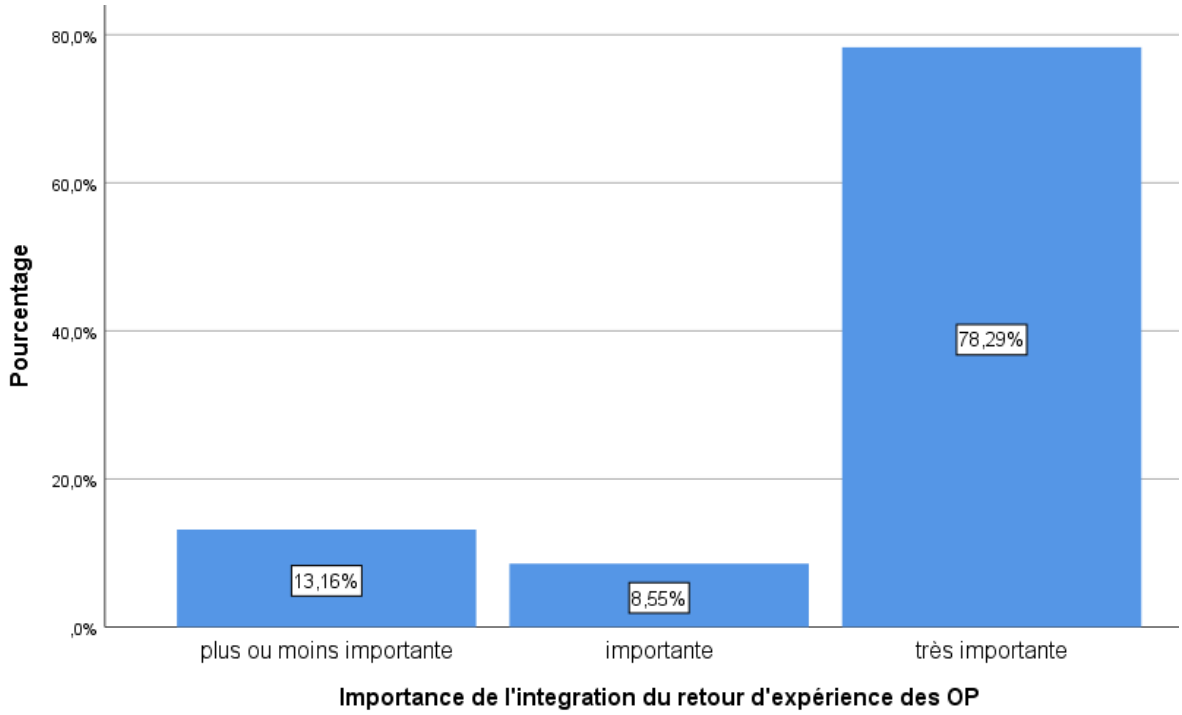


Figure 28. Importance de l'intégration du retour d'expérience des opérateurs de production dans la résolution des problèmes liés aux équipements.

La majorité des répondants (78,29%) admettent que l'intégration du retour d'expérience des opérateurs de production dans la résolution des problèmes liés aux équipements s'avère très importante ce qui reflète un terrain industriel fertile et conscient de l'exploitation du retour d'expérience étant le fruit de l'interaction quotidienne Homme-machine.

Cette constatation est valable pour toute taille et secteur d'activité d'entreprise. Autrement dit, l'intégration du retour d'expérience s'avère très importante quels que soit la taille de l'entreprise (petite, grande ou moyenne) et le secteur d'activité, ce qui a été confirmé par des valeurs de p de 0.742 et 0.171 respectivement étant toutes les deux supérieures à 0.05 comme le montre le résultat du test Kruskal-Wallis réalisé sur SPSS présenté dans les tableaux 18 et 19.

Tableau 18. Test de Kruskal Wallis pour l'importance de l'intégration du retour d'expérience par rapport à la taille de l'entreprise.

Tests statistiques a,b	
	Importance de l'intégration du retour d'expérience des opérateurs de production
H de Kruskal-Wallis	0,597
ddl	2
Sig. asymptotique	0,742
a. Test de Kruskal Wallis	
b. Variable de regroupement : Taille de l'entreprise	

Tableau 19. Test de Kruskal Wallis pour l'importance de l'intégration du retour d'expérience par rapport au secteur d'activité.

Tests statistiques a,b	
	Importance de l'intégration du retour d'expérience des opérateurs de production
H de Kruskal-Wallis	6,396
ddl	4
Sig. asymptotique	0,171
a. Test de Kruskal Wallis	
b. Variable de regroupement : Secteur d'activité	

5.3. Motivation pour l'implantation d'une plateforme de communication et coordination avec l'opérateur de production.

Dans le contexte d'un environnement industriel évolutif qui est de nos jours plus dépendant des nouvelles technologies de l'information et de communication, on a évalué la motivation des industriels concernant l'utilisation de ce genre d'outil pour une meilleure efficacité opérationnelle de l'intégration du retour d'expérience pour la résolution des problèmes en maintenance via la question suivante :

Encouragez-vous l'implantation d'une plateforme de communication et de coordination à distance avec l'opérateur de production dans le but d'améliorer la disponibilité des équipements ?

Les résultats d'analyse de cette question montrent que 98.68% des responsables maintenance sont motivés pour l'implantation d'une plateforme de communication et coordination avec l'opérateur de production pour la mise en place des stratégies de maintenance pour résoudre les problèmes liés aux équipements.

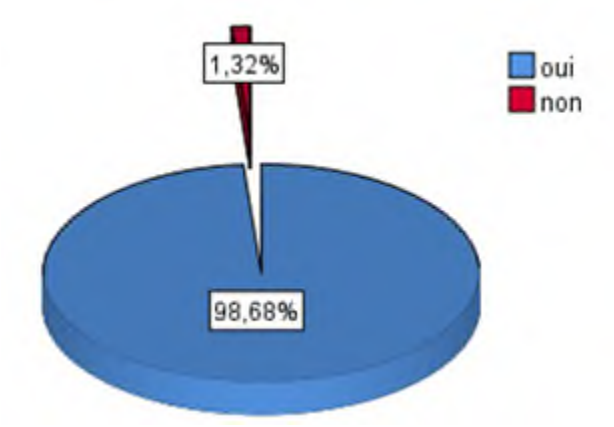


Figure 29. Motivation pour l'implantation d'une plateforme de communication et coordination avec l'opérateur de production.

Les responsables maintenance admettent le besoin d'une plateforme de communication et coordination avec l'opérateur de production. Ce besoin est exprimé par les systèmes de production marocains de toute taille et de tout secteur d'activité comme justifié par les résultats du Test de Kruskal Wallis présentés dans les tableaux 20 et 21.

Tableau 20. Test de Kruskal Wallis pour l'implantation d'une plateforme de communication et coordination avec l'opérateur de production par rapport à la taille d'entreprise.

Tests statistiquesa,b	
	Implantation d'une plate-forme de communication et coordination
H de Kruskal-Wallis	4,787
ddl	2
Sig. asymptotique	0,091
a. Test de Kruskal Wallis	
b. Variable de regroupement : Taille de l'entreprise	

Tableau 21. Test de Kruskal Wallis pour l'implantation d'une plateforme de communication et coordination avec l'opérateur de production par rapport au secteur d'activité.

Tests statistiquesa,b	
	Implantation d'une plate-forme de communication et coordination
H de Kruskal-Wallis	3,654
ddl	4
Sig. asymptotique	0,455
a. Test de Kruskal Wallis	
b. Variable de regroupement : Secteur d'activité	

5.4. Synthèse

Dans la perspective de positionner le retour d'expérience au sein des systèmes de production marocains et son exploitation pour servir les objectifs et stratégies de maintenance, on a premièrement évalué la pratique de collecte du feedback de l'opérateur de production pour la résolution des problèmes liés aux équipements, ce qui a dévoilé l'aspect rare (53,29%) de cette pratique ne faisant pas encore partie de la culture industriel de la majorité des systèmes de production (aucun répondant n'a choisi la fréquence « systématiquement »), ce qui reste le point affaiblissant les efforts d'amélioration en maintenance. Afin d'évaluer la motivation des industriels pour l'intégration du retour d'expérience, on a demandé l'avis des responsables maintenance (78,29%) qui ont jugé très importante l'intégration du retour d'expérience pour la résolution des problèmes liés aux équipements et qui ont exprimé le besoin d'un outil efficace de communication et coordination avec l'opérateur de production encourageant ainsi l'implantation d'une plateforme de communication et coordination constituant la jonction de collaboration entre le département maintenance et l'opérateur de production (98,68% des réponses encourageantes).

III. Conclusion

Les résultats de l'analyse détaillés précédemment résument les réponses collectées de 152 systèmes de production marocains de différentes tailles et de différents secteurs d'activité. la réalité de terrain témoigne un niveau insuffisant de communication et implication de l'opérateur de production ainsi qu'un niveau d'organisation requérant plus d'efforts pour maitriser l'environnement logistique de travail étant très influent sur le déroulement des interventions et du rendement des opérateurs. Attestant l'absence d'une culture efficace gérant ces contraintes, le besoin de s'orienter vers un nouveau cadre managérial s'avère de

grand intérêt. En effet, au cours de nos entretiens avec les responsables maintenance, on a discuté l'intérêt d'orienter la vision managériale de la maintenance envers une perspective plus durable gérant l'ensembles des ressources de la maintenance dressant ainsi un nouveau cadre de travail « la logistique maintenance » ou le système logistique maintenance restant un cadre prometteur pour le déploiement du lean dans la mesure d'implanter toute démarche d'amélioration et en particulier pour la résolution des problèmes liés aux équipements.

Afin d'évaluer et prévoir l'impact de cette perspective aux yeux des responsables maintenance, on leurs a adressé des questions ciblant quatre champs de bénéfices (l'environnement logistique de travail, la culture du facteur humain, le coût et le temps de la maintenance) dont l'impact positive du lean a été prévu et jugé « bénéfique ». Quoique la culture du facteur humain reste bénéficiaire de l'implantation de la philosophie lean, ce champ reste le plus challengeur présentant plus de difficulté liée à l'aspect pratique du changement de la culture du système de production. Cette difficulté se traduit par l'absence de la culture de collecte du feedback de l'opérateur de production étant le résultat d'une interaction quotidienne entre l'opérateur et son outil de production. Ainsi l'intégration du retour d'expérience de l'opérateur de production reste très importante comme décrite par les répondants reflétant la conscience et la motivation des systèmes de production marocains pour expérimenter cette alternative exprimant ainsi, le besoin d'un formalisme pratique d'intégration de ce retour d'expérience. En d'autres termes, l'industrie marocaine révèle le besoin d'une plateforme pour communiquer et coordonner avec l'opérateur de production dans le cadre du MICS (sous-système d'information et de communication de la maintenance) pour la mise en place de ses stratégies de maintenance au niveau du sous-système physique (MPS) dont l'objectif est de résoudre les problèmes liés aux équipements plus efficacement et flexiblement.

.

Chapitre 4. L'intégration du Lean en management de la logistique maintenance : un nouveau cadre durable

I. Introduction

De nos jours, les défis industriels ont rendu la performance un terme complexe en particulier dans le contexte de la maintenance restant en premier lieu étroitement lié à la disponibilité du système.

La mission de la partie responsable de la disponibilité est devenue compliquée du fait de la réalité industrielle contradictoire et de la portée du développement durable qui semblent à la fois, à la plupart des entreprises, aussi abstraite et éloignée de la réalité industrielle qu'elles souffrent encore de problèmes de maintenance et notamment de problèmes liés à l'interaction homme-machine. Pragmatiquement, la concrétisation des objectifs de durabilité par rapport au contexte industriel actuel, étant l'accord le plus difficile et le plus contradictoire, pourrait devenir une percée industrielle lorsqu'elle commence à être considérée comme une perspective d'implantation du lean dans un cadre managérial portant sur les trois dimensions du développement durable. Or la perspective de recherche actuelle reste œuvrant autour de la perspective lean/green : le lean considéré comme méthodologie et le green comme un résultat logique. Bien qu'elle soit d'un grand intérêt scientifique, cette perspective fait du cadre du développement durable un périmètre plus rétréci et limité ignorant le rôle de la dimension sociale en maintenance.

Dans l'objectif de définir une vision plus claire du cadre managérial de la maintenance, il reste nécessaire de cerner le contexte du défi lean / durabilité dans la littérature, en outre il reste primordial de définir une scène empirique encore plus rapprochée de la réalité industrielle via des études de cas pour avoir une vision complète permettant de définir le chemin vers un nouveau cadre durable pour le management de la maintenance.

II. La philosophie Lean

La philosophie Lean puise ses racines dans le secteur du manufacturing japonais, initiée par Taiichi Ohno pour définir de nouveaux outils pour les processus des opérations chez Toyota Motors Corporation et donner le fameux exemple d'un système de production lean appelé le système de production Toyota (Toyota Production System (TPS)) [15] [68]. Parmi ces outils le juste à temps (Just in Time (JIT)), la méthode Kanban, le respect des employés et les potentiels élevés de résolution de problèmes des employés, « cette conception des opérations du lean management » comme décrite par Hines, et al est principalement centrée sur l'élimination des gaspillages dans les flux de TPS [69].

Selon Ohno, les gaspillages sont toutes les activités sans valeur ajoutée aux produits, ils ont été classés en 7 types [15] (Figure. 30). Les gaspillages sont également définis comme toute activité entraînant un coût supplémentaire pour un produit ou un service sans valeur ajoutée du point de vue client [70].



Figure 30. Les 7 types de gaspillages [15].

Bicheno a ajouté sept autres gaspillages à ceux d'Ohno [71], tandis que Liker Jk a ajouté un huitième type « créativité inutilisée des employés » [72] ce que Womack et Jones ont appelé « Sous-utilisation des employés » [73]. Ce dernier type peut-être la raison pour laquelle de nombreux systèmes de production manquent d'importantes opportunités d'amélioration.

Le tableau 22 donne les premières principales références établissant la classification des gaspillages et définissant ses types dans la perspective du lean. Les premières initiatives ont défini les types de gaspillages dans les processus de production pour aborder la fabrication sans gaspillages ou lean manufacturing qui a été largement répartie dans les systèmes de production industriels à travers le monde inspirés par le TPS (Toyota Production System), mais la fabrication industrielle (ou le manufacturing) ne peut être correctement qualifiée de lean en négligeant les sources de pertes en maintenance, le fait qui est clairement indiqué par Kaczmarek dans la définition du lean manufacturing «Le lean manufacturing est la pratique d'éliminer les déchets dans tous les domaines de la production, y compris les relations clients, la conception de produits, les réseaux de fournisseurs, les flux de production, la maintenance, l'ingénierie, l'assurance qualité et la gestion d'usine » [74]. Par conséquent, le besoin d'une lean maintenance est devenue plus concrètement

exprimé, incitant les chercheurs à discuter la philosophie lean du point de vue de la maintenance, en définissant les gaspillages en maintenance comme une alternative pour projeter la pensée lean ou le lean thinking dans les opérations et processus de maintenance. Le terme "lean maintenance" a été introduit pour la première fois au cours de la dernière décennie du $20^{ème}$ siècle. C'est une adoption des principes du lean en maintenance [70] pour réduire la consommation des intrants de maintenance [75]. En fait, il s'agit d'une tentative de réduction des gaspillages de la maintenance.

Le tableau 22 présente une classification des types de gaspillages identifiés dans la littérature selon le contexte.

Tableau 22. Classification des gaspillages selon le contexte.

Contexte du gaspillage	Références	Types de gaspillages	Année de publication	Contexte des initiatives du lean thinking
Production	[15]	Surproduction ; surprocess/traitement inapproprié ; Surtransportation/transport inutile ; Temps d'attente ; Stock inutiles ; Défauts/erreurs ; Mouvements inutiles ;	1988	Lean manufacturing
	[71]	Gaspillage du potentiel humain ; Systèmes inappropriés; Gaspillages d'eau et d'énergie; Gaspillage de la matière et du matériel; Gaspillage des services et bureaux; Gaspillage du Temps du client ; Perte des clients ;	2000	
	[73] [72]	Sous-utilisation des employés ; Créativité inutilisée des employés ;	2003 2004	
	[79] [80]	Gaspillages non évidents; Gaspillages moins évidents; Gaspillages évidents ;	2004 2006	
Maintenance	[78] [81]	Maintenance improductive; Attente des ressources de maintenance; Maintenance centralisée; Mauvaise gestion des stocks; Mouvements inutiles; Mauvaise maintenance (insuffisante /inefficace) ; Gestion inefficace des données; Sous-utilisation des ressources;	2010	Lean maintenance

Les gaspillages en maintenance (présentés dans la figure 31) engendrent des gaspillages pénalisant tous le système de production vue leurs influence sur la disponibilité du système principal. Les alternatives de lutte contre les gaspillages en maintenance étant rarement discutées demeurent les rails de base construisant une piste pour l'implantation de la philosophie lean en maintenance. Or, l'absence d'un cadre orienteur pour lutter durablement et efficacement contre ces gaspillages reste le point faible des tentatives d'implantation du lean. De plus, Le dernier type de gaspillage mentionné (Sous-utilisation des ressources) constitue l'obstacle principal devant l'implantation du lean et devant toute tentative d'amélioration en maintenance. Ce type est le plus répondu dans la majorité des systèmes de production comme le confirme les résultats d'analyse des questionnaires témoignant une implication insuffisante de la ressource centrale (l'opérateur de production).



Figure 31. Les principaux gaspillages en maintenance [78][81].

III. Le défi Lean/durabilité.

La performance durable est un projet à long terme dans le contexte des systèmes de production et une question de recherche importante ayant été explorée au cours des dernières décennies. La plupart des articles de recherche analysés ont discuté des paradigmes du lean manufacturing et le manufacturing durable ou green manufacturing dans une vision à une ou deux dimensions, discutant des avantages économiques de la

mise en œuvre du lean dans le secteur manufacturier ou fréquemment ceux relatifs à la perspective environnementale investiguant les avantages verts de la philosophie lean.

L'initiative de réduction des gaspillages rappelle les initiatives lean/green que Abreu, et al considèrent "une approche valable pour soutenir et soutenir une activité industrielle plus verte". Le lean/ green est un concept de combinaison valeur-efficacité dans un contexte environnemental opérationnel [77]. En fait, la plupart des modèles Lean/Green visent l'amélioration de la productivité avec moins d'impacts environnementaux.

La revue de la littérature (du tableau 23) montre un nombre limité d'articles discutant des aspects lean / durabilité se référant si souvent aux aspects lean / green dans le contexte industriel. Le fait qui a également été déclaré par Abreu, et al identifiant un nombre limité de modèles lean / green publiés depuis 2012 [77]. La plupart des articles de la littérature se concentrent sur le concept de réduction des gaspillages résumant les avantages de l'approche Lean en mentionnant l'impact économique des initiatives Lean via la réduction des coûts ou en les étendant à la perspective environnementale reflétant leur impact vert.

En analysant les différentes contributions, nous avons constaté que cette thématique a été traitée de manière à prouver le lien entre les deux aspects lean et green, à reconnaître les avantages des initiatives lean / green grâce à la réduction du niveau de gaspillage ou à présenter rarement un modèle de mise en œuvre qui reste en réalité une alternative pour une implémentation partielle du lean concernant certaines opérations de production dans le contexte spécifique d'un système de production choisi dans l'optique d'une perspective environnementale.

Les principales observations déduites de la littérature dans le secteur du manufacturing pourraient être rappelées via les points suivants :

- Le lean manufacturing et le manufacturing durable sont reconnus pour leur impact positif sur la performance des systèmes de production.
- Les aspects Lean et durabilité sont synergiques.
- Les aspects de durabilité ont été présentés à travers une vision limitée discutant une seule ou double dimension (économique ou environnementale) alors que la dimension sociale était totalement absente.

Tableau 23. Aspects lean / durabilité en manufacturing [89].

Références	Contexte d'implantion du lean	methodologie	Aspet étudié relatif à la durabilité	Dimension de maintenance mentionnée ou ciblée	Résultats et conclusions
[86]	Manufacturing	Revue de Littérature.	Relation entre le Lean manufacturing et le manufacturing durable.	▪ Environnement	▪ La synergie Lean et durabilité est soutenue par des résultats verts plus intéressants dans les systèmes Lean. ▪ Un impact positif clair du manufacturing durable et du lean sur la performance a été identifié. ▪ Aucune méthode d'évaluation de cet impact n'a été fournie ▪ La performance sociale n'a pas été largement explorée.
[82]	Manufacturing	Etude empirique basée sur des questionnaires adressés à 31 usines d'assemblage automobile en Amérique du Nord et au Japon.	Réduction des émissions atmosphériques de composés organiques volatils.	▪ Environnement	▪ Le lien entre les pratiques Lean et l'efficacité des ressources est soutenu. ▪ Les aspects du lean management peuvent être liés aux pratiques de management environnemental.
[77]	Manufacturing	Revue de Littérature.	Eco-efficacité dans le cadre des modèles lean green.	▪ Environnement	▪ Un nombre limité de modèles lean / green ont été identifiés. ▪ L'objectif principal des modèles lean / green se concentre sur l'amélioration de la productivité des systèmes.

[84]	Manufacturing	Etude de cas dans une cellule de production.	Intégration de la pensée Lean et des pratiques vertes pour réduire les impacts environnementaux en réduisant les gaspillages de production.	▪ Environnement ▪ Economie	▪ Proposition d'un nouveau modèle lean / green pour une cellule de production conduisant aux résultats suivants après application dans une société d'ingénierie internationale : • Réduction de l'utilisation des ressources de 30% à 50%. • Réduction du coût total des flux massiques et énergétiques dans une cellule de 5% à 10%.
[85]	manufacturing	Etude empirique basée sur des questionnaires adressés à 186 dirigeants d'usine aux Etats Unies.	Lien entre les pratiques de lean manufacturing, la performance environnementale et opérationnelle	▪ Environnement	▪ Les pratiques du lean manufacturing sont positivement associées à la performance environnementale et opérationnelle.
[76]	manufacturing	Revue de littérature.	Lean push/pull considérant le respect de l'implantation verte.	▪ Environment ▪ Economie	▪ L'examen suggère que l'adoption de pratiques lean a un effet positif sur la performance environnementale et organisationnelle. Les concepts du lean et du green sont synergiques.

Le défi lean / durabilité a été moins fréquemment discuté dans le domaine spécifique de la maintenance que dans le contexte du manufacturing.

Le management de la maintenance restant étroitement liée aux défis de durabilité pour des processus de maintenance plus efficaces et durables, la pensée Lean ou le lean thinking s'en avère une alternative pour projeter l'efficacité et l'excellence sur le terrain de maintenance. De plus, il est considéré un prérequis en maintenance des systèmes de production lean [70] [87].

Bien que le terme lean maintenance a plutôt apparu à la fin du 20ème siècle, la plupart de ses publications de recherche connexes restent limitées et, par conséquent, il est nécessaire de mener davantage de recherches sur l'implantation du lean en maintenance [78] [70].

Pour explorer comment le défi lean / durabilité a été traité dans le domaine de la maintenance, nous avons effectué une revue de la littérature à partir de laquelle nous présentons un résumé des principales références et leurs résultats détaillés dans le tableau 24.

Tableau 24. Aspects Lean / durabilité en maintenance [89].

Référence	Domaine d'implantation du Lean	Méthodologie	Aspet étudié relatif à la durabilité	Dimension de durabilité ciblée ou mentionnée	Résultats et conclusions
[87]	maintenance	Revue de littérature.	Identification des gaspillages et reduction des coûts	• Économie	• Le Lean en maintenance est indispensable pour les systèmes de production lean. • Huit types de gaspillage ont identifiés. • Proposition d'une carte pour l'implantation du lean thinking dans un processus de maintenance.
[83]	maintenance	Revue de littérature.	Choix de stratégies de maintenance pour favoriser un suivi régulier des performances et réduire les impacts environnementaux.	• Environnement	• Rôle du management de la maintenance dans l'intégration de la performance pro-environnementale. • Contribution des méthodes et techniques de maintenance au management environnemental via la mesure de la performance.
[65]	maintenance	Revue de littérature.	Efficacité ou productivité sans gaspillages	• Économie	• Discussion du concept de productivité sans gaspillage ou d'efficacité. • Un besoin d'une vision différente du lean dans le contexte de la maintenance est nécessaire en tenant compte de la dynamique de l'entreprise.
[87]	maintenance	Revue de littérature.	Intégration de la pensée Lean dans les activités de maintenance	• Économie	• La pensée Lean reste un prérequis pour les systèmes de production lean. • Elaboration d'un schéma d'outils de Lean maintenance pour atteindre le statut d'amélioration et d'excellence de la maintenance.
[88]	maintenance	Revue de littérature.	Identification des éléments communs des nouveaux paradigmes.	• Économie • Environnement	• Comprendre la synergie entre les paradigmes lean et green et l'amélioration globale de l'efficacité de la maintenance • Les résultats du processus de maintenance ont un double impact ou des aspects connexes économiques et écologiques.

La plupart des articles analysés discutent le défi lean / durabilité dans le contexte de maintenance dans une alternative pour importer les avantages de la pensée lean au domaine de la maintenance. La durabilité a été indirectement introduite à travers des aspects liés à ses deux dimensions (environnement et économie) avec une attention particulière orientée vers la réduction des coûts étant un résultat de l'implantation du lean et de la réduction des gaspillages, ou plus généralement découlant de l'efficacité et de l'amélioration des performances globales. Cette dernière perspective implique la dimension économique qui met en évidence l'identification des gaspillages et la réduction des coûts [70], le concept qui était exprimé différemment par la productivité sans gaspillage [65] à travers l'incorporation des initiatives de la pensée lean ou du lean thinking dans les activités de maintenance [83] visant à atteindre l'amélioration et l'excellence en maintenance [87]. Les deux dimensions ont été discutées de manière à comprendre la synergie entre les paradigmes lean et green [88].

De telles initiatives lean / durables restent peu explorées et limitées aux deux dimensions de la durabilité alors que la troisième dimension a toujours été ignorée le fait qui a été également observé dans le domaine du manufacturing.

Les principales conclusions de l'analyse de la revue de la littérature dans le domaine de la maintenance sont représentées par les points suivants dont certains ont été communément identifiés en manufacturing:

- La pensée Lean demeure un prérequis pour les systèmes de production Lean.
- La synergie Lean et durabilité est prouvée à travers l'efficacité globale de la maintenance.
- La dimension sociale reste non discutée dans les articles analysés traitant le défi lean/durabilité en maintenance.
- Absence du cadre durable de management de la maintenance pour promouvoir la mise en œuvre du lean thinking considérant les trois dimensions du développement durable.
- Aucun modèle n'a été identifié investiguant la valorisation de la dimension sociale dans l'implantation du lean thinking en maintenance.

L'implantation de la philosophie Lean reste beaucoup plus difficile dans le domaine de la maintenance pour de nombreuses raisons et points critiques :

- Manque de collaboration entre les services particulièrement entre les services maintenance et production.
- Le lean thinking est souvent directement projetée dans le domaine de la maintenance, ce qui ne pourrait garantir une implantation réussie de cette philosophie sans une adaptation ou une contextualisation par rapport aux objectifs et contraintes de la maintenance.

- La dimension sociale reste souvent marginalisée ou superficiellement soulignée et ciblée via les principes du lean en l'absence d'une démarche collective standardisée, cette marginalisation est effectivement considérée un type de gaspillage reflétant la créativité inutilisée des ressources humaines.
- Une vision managériale pratique est requise nécessitant plus de concentration pour intégrer de manière pragmatique la troisième dimension de durabilité (la dimension sociale).

IV. Le défi Lean / durabilité en maintenance : Deux études de cas des industries Marocaines et Canadiennes.

De nombreux problèmes ont été identifiés via l'analyse de deux études de cas dans deux systèmes de production œuvrant dans l'industrie de l'acier et dans la fabrication des coussins des moyens de transports après de longues interviews avec leurs responsables maintenance aboutissant aux problèmes communs présentées par le diagramme en arête de poisson ou Ishikawa (figure 32) pour définir une scène plus rapprochée de la réalité industrielle des deux systèmes.

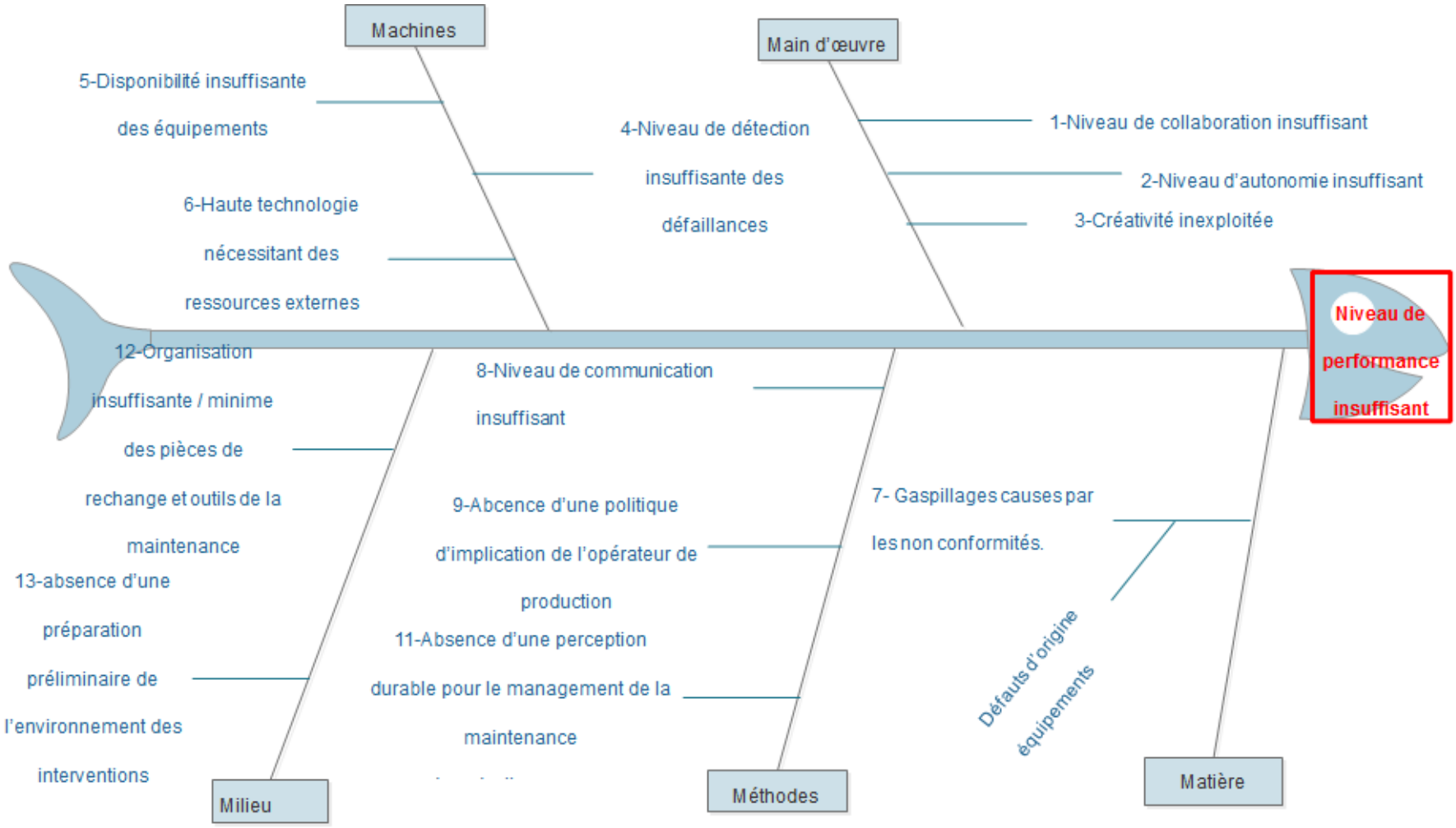


Figure 32. Diagramme d'Ishikawa des principaux problèmes de maintenance identifiés affectant les performances du système de production dans deux systèmes de production différents au Maroc et au Canada.

Les problèmes, cités dans le diagramme d'Ishikawa, qui entraînent souvent les performances du système principal vers des niveaux très bas, ne peuvent pas être vus par l'œil de maintenance ou l'œil de production indépendamment. Les deux yeux sont témoins de ces problèmes qui ont un impact sur la disponibilité du système et généralement sur la performance globale de ses processus.

Pour analyser les principales causes des problèmes dans leur relation avec le défi lean/durabilité, nous avons adressé quatre questions aux responsables maintenance des deux systèmes de production et une autre question aux opérateurs de production.

Les quatre premières questions adressées aux responsables maintenance sont les suivantes :

1- Avez-vous déjà implanté la philosophie lean au sein de votre système de production ?

Les deux sociétés ont assuré qu'elles n'ont pas encore implanté le lean dans leurs systèmes de production.

2- Comment qualifiez-vous la collaboration des opérateurs de production dans la mise en place des nouvelles stratégies d'amélioration en la maintenance ?

Pour répondre à cette question, nous avons fourni une échelle à cinq niveaux pour évaluer le niveau de collaboration de l'opérateur : allant d'un niveau de collaboration très faible à un niveau de collaboration excellent :

- Niveau de collaboration très faible
- Niveau de collaboration faible
- Niveau de collaboration moyen
- Niveau de collaboration suffisant
- Niveau de collaboration excellent

Là encore, nous avons constaté que les deux sociétés ont choisi un faible niveau de collaboration pour qualifier la réaction des opérateurs de production à la mise en place de nouvelles stratégies de maintenance concernant leur équipement ou leur outil de production.

3- Comment jugez-vous l'implantation de la philosophie lean en maintenance ?

- Très bénéfique
- Bénéfique
- Plus ou moins bénéfique
- Peu bénéfique
- Pas du tout bénéfique

Les deux entreprises ont répondu très bénéfique.

4- Comment prévoyez-vous le niveau de difficulté d'implantation de la philosophie lean en maintenance dans le contexte de durabilité et du niveau de collaboration actuel de l'opérateur (en particulier celui de l'opérateur de production) ?

Les deux sociétés ont confirmé que cette implantation serait difficile compte tenu du niveau de collaboration actuel du facteur humain en général et en particulier celui de l'opérateur de production.

On a aussi adressé la question suivante aux opérateurs de production des deux systèmes :

À quelle fréquence êtes-vous informé des nouvelles stratégies et pratiques de maintenance adoptés par votre entreprise ?

- Jamais
- Rarement
- Quelquefois
- Souvent
- Toujours / systématiquement

La plupart des opérateurs des deux systèmes de production ont affirmé que la communication de nouvelles stratégies et pratiques de maintenance n'est pas un processus systématique dans leurs entreprises. En fait, dans le contexte canadien 88,23% des opérateurs ont choisi « quelquefois » pour décrire cette fréquence de communication. Cette vérité a été clairement confirmée par le système de production marocain où 78% des opérateurs de production ont décrit la fréquence de communication par l'adverbe « rarement ». Cela se réfère à un processus occasionnel lorsqu'un événement alarme le responsable maintenance exprimant un besoin persistant d'informer les opérateurs sur une stratégie ou une pratique spécifique et restant encore loin d'une culture pratiquée systématiquement.

V. Synthèse

À travers les deux études de cas, nous avons identifié les principaux problèmes liés au défi lean / durabilité en maintenance, ce qui est expliqué par les réponses données par les responsables maintenance et les opérateurs de production dans les systèmes de production étudiés au Maroc et au Canada.

- Les résultats des deux études de cas ont dévoilé les constatations suivantes [89] :
- La collaboration du facteur humain est encore insuffisante exprimée par un faible niveau dans les deux systèmes (notamment la collaboration de l'opérateur de production).
- Les deux systèmes de production reconnaissent les avantages de l'implantation du lean dans le contexte de durabilité même s'ils ne l'ont pas encore mis en place en production.
- La difficulté d'implantation du lean a été naturellement prédite vue le niveau de collaboration actuel.
- Le faible niveau de collaboration peut s'expliquer par le faible niveau de communication avec les opérateurs de production.
- Absence d'un standard de communication systématique impliquant collectivement les opérateurs de production dans les nouvelles stratégies d'amélioration de la maintenance.

VI. Conclusion

Les résultats des deux études cas peuvent être généralement résumés par l'absence de l'intégration de la dimension sociale dans les initiatives d'amélioration ou d'implantation de la philosophie lean en maintenance, ce qui soutient les conclusions de la revue de la littérature.

Les résultats de la revue de littérature et des questionnaires collectés de 152 systèmes de production marocains soulignent les mêmes problèmes vus de près à travers ces deux études de cas témoignant le besoin d'un nouveau cadre durable pour le management de la maintenance prenant en considération les trois dimensions du développement durable avec une attention particulière consacrée à la dimension sociale étant le facteur de réussite de toute stratégie d'amélioration dans les deux autres dimensions.

Chapitre 5. La logistique maintenance : un nouveau modèle durable

I. Introduction

Ce chapitre discute la logistique maintenance dans un cadre durable étant une approche générique répondant aux objectifs de recherche après avoir discuté les conclusions des deux études bibliographique et empirique. Le management de la logistique maintenance dans ce cadre durable étant une approche pour la lutte contre les gaspillages est introduite via la gestion de l'environnement de travail et la gestion des connaissances, voir des expériences.

Cette approche ne peut donner son fruit sans un modèle d'implantation. Pour ce, nous proposons un modèle Lean/REX pour l'intégration de la dimension humaine dans le cadre d'un modèle générique durable de la logistique maintenance.

II. La logistique maintenance : un cadre durable pour lutter contre les gaspillages

1. Vers un modèle générique durable

La maintenance, généralement considérée comme un ensemble de tâches, d'activités ou même de processus, maintient de nombreux problèmes cachés et marginalisés. Ainsi, une vision plus étendue est fortement requise pour couvrir tous les problèmes et les aspects des processus ou projets de maintenance. Il s'agit d'exprimer la nécessité d'un management optimal de la logistique maintenance au lieu d'une vue imprécise de la maintenance restant éloignée des objectifs de durabilité. La logistique maintenance, étant un cadre durable et prometteur pour l'implantation du lean en management de la maintenance est une nouvelle piste pour la lutte contre les gaspillages ainsi que pour l'atteinte de l'objectif principal "l'amélioration de la disponibilité du système en ciblant le zéro panne". C'est effectivement l'objectif d'une lean logistique maintenance, lean comme méthodologie et la logistique maintenance comme un cadre durable de son implantation. Cependant, elle ne peut se qualifier de durable sans une vision managériale durable couvrant toutes les ressources et par ce toutes les dimensions du développement durable comme le présente la figure 33.

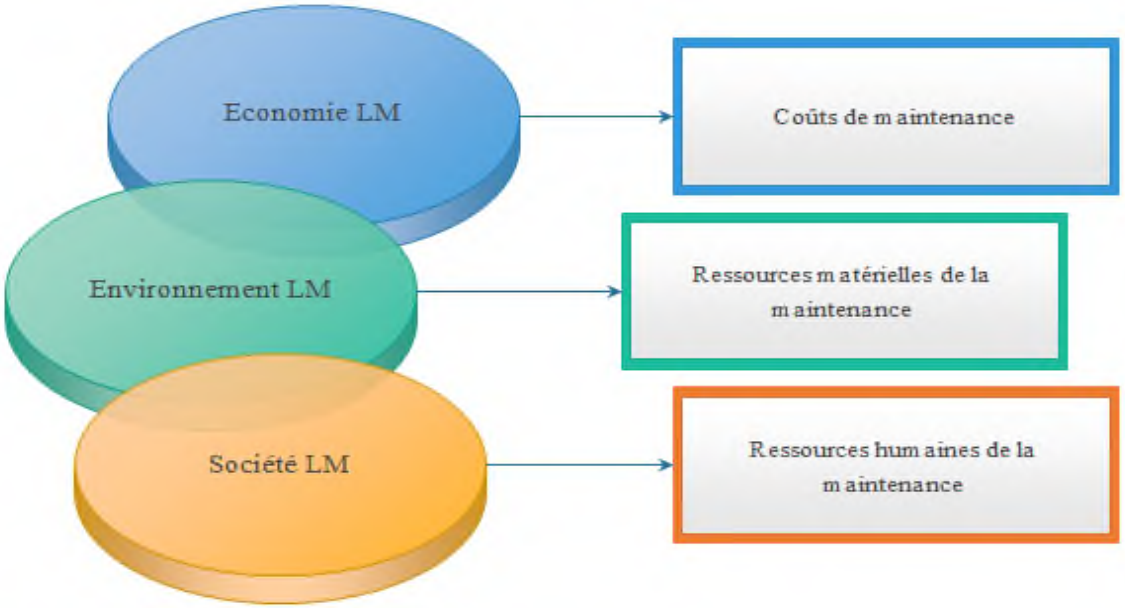


Figure 33. Dimensions de la logistique maintenance dans un cadre durable [158].

Les gaspillages peuvent être classés selon trois niveaux par rapport aux sous-systèmes du système logistique maintenance que nous avons prédéfini [41] pour en définir 3 grands niveaux de gaspillages [158] comme le montre la figure 34.

- Gaspillages du niveau stratégique.
- Gaspillages du niveau communicationnel.
- Gaspillages du niveau physique.

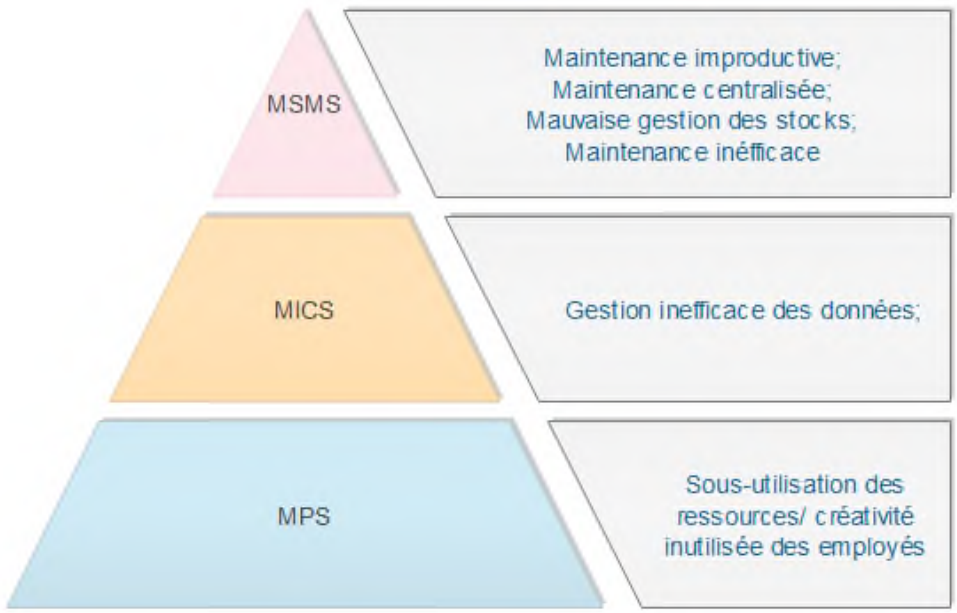


Figure 34. Gaspillages et leurs niveaux d'origine dans le système logistique maintenance.

Les gaspillages du niveau stratégique sont les gaspillages provenant des mauvaises stratégies ou approches managériale ou de l'absence de certaines méthodes ou politique de maintenance. Alors que les gaspillages du niveau communicationnel reflètent une gestion inefficace des flux d'information, des interactions ou des données de la maintenance. Le dernier niveau de gaspillage est situé au niveau du sous-système physique de maintenance reflétant souvent une ressource inactive ou sous-utilisée dont la créativité inexploitée de l'employé est l'exemple le plus répandu témoigné par les conclusions des revues de littérature, des résultats des questionnaires ainsi que ceux des études de cas. Toutes les conclusions de ces études (bibliographiques et empiriques) font preuve d'une implication très timide de l'opérateur de production en résolution de problèmes liées aux équipements et confirment le besoin d'une méthode pratique pour l'implication collective des opérateurs et l'intégration du retour d'expérience de l'opérateur de production en particulier.

La maintenance improductive découlant de l'absence de cette méthode et constituant un gaspillage du niveau stratégique est à l'origine du gaspillage du potentiel humain au niveau physique. Ainsi, le besoin d'un nouveau modèle pour la lutte contre ce type de gaspillage s'avère nécessaire.

Le management de la logistique maintenance étant un levier primordial pour une gestion optimale de toutes les ressources demeure une alternative prometteuse en l'orientant vers une vision générique gérant les aspects organisationnels et interactionnels couvrant ainsi les dimensions du développement durable. À cet égard, nous proposons un modèle générique (représenté par la figure 35) pour le management de la logistique maintenance dressant la carte méthodique pour concrétiser la notion de durabilité en management de la maintenance dans le cadre du système logistique maintenance. Les deux outils proposés pour l'implantation du modèle seront détaillés dans les paragraphes du présent chapitre ainsi que dans le chapitre qui suit.

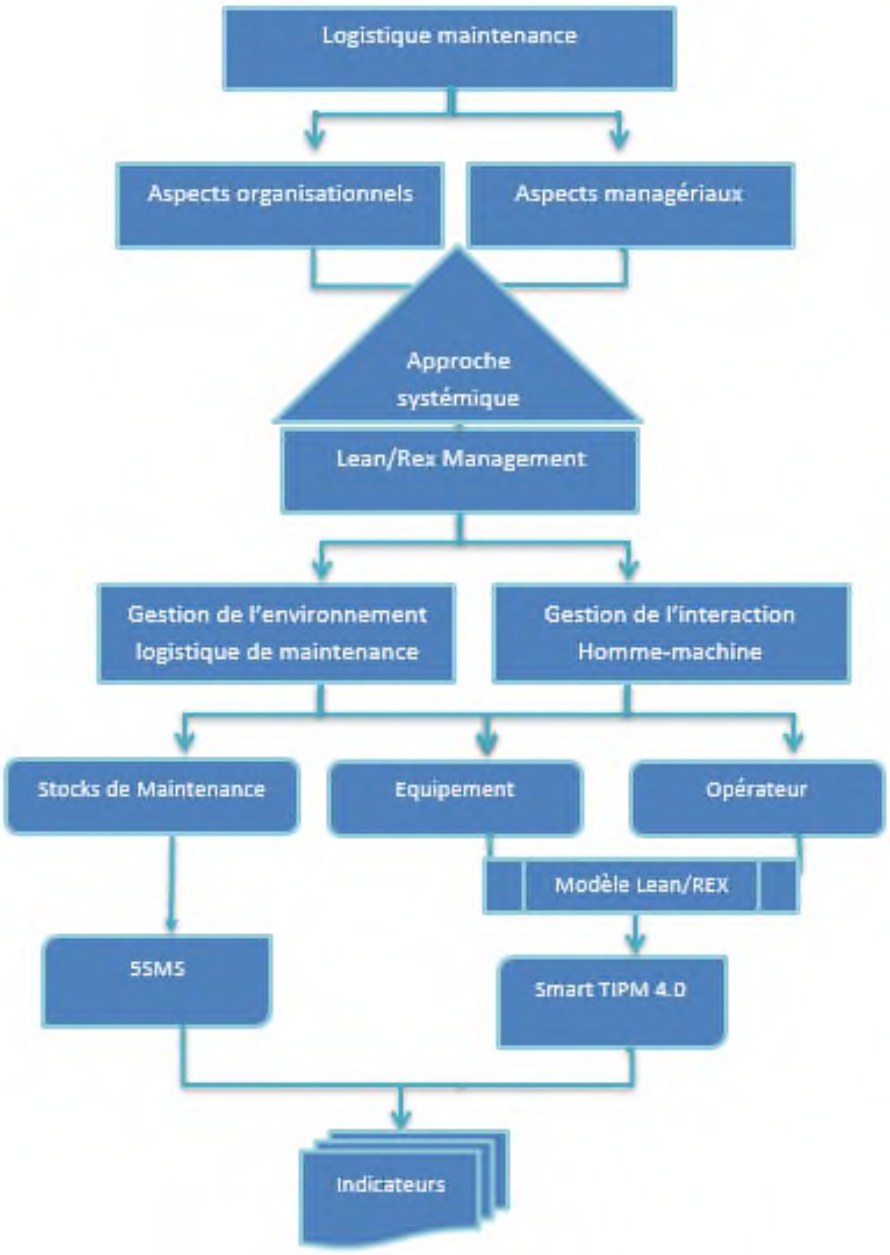


Figure 35. Modèle générique durable de la logistique maintenance [98].

2. Gestion de l'environnement logistique de maintenance

2.1. Importance du déploiement des 5S.

L'environnement logistique de travail est un facteur influent affectant la performance globale des activités de maintenance. Le fait qui est soutenu par les résultats de l'analyse des questionnaires où 96.05% des réponses se situent entre influent (44.08%) et très influent (51,97%) qualifiant le niveau d'influence d'organisation de l'outillage ou des éléments du stock de maintenance.

53,29% des systèmes de production enquêtés témoignent un niveau insuffisant d'organisation de l'outillage (ou stock de maintenance en général) attestant que l'outillage de maintenance reste peu organisé et nécessite une meilleure organisation ou une réorganisation afin de maitriser l'environnement de travail influent sur le rendement des opérateurs, confirmant ainsi l'importance d'une organisation efficace permettant la diminution du temps de recherche des outils, d'un moyen ou d'un élément du stock de maintenance.
Le problème d'organisation de l'environnement logistique de maintenance étant directement impacté par l'organisation non optimale des outils et consommables de maintenance révèle plusieurs points critiques dévoilés lors d'un stage de recherche en industrie de l'acier, pénalisant le déroulement des activités quotidiennes de maintenance entre autres :

- Identification difficile des outils et consommables de la maintenance.
- Éloignement des locaux de l'outillage de maintenance des ateliers de production.
- Difficulté de gestion des stocks de maintenance.
- Locaux de maintenance non optimisés en termes d'économie d'espace.
- Temps de recherche relativement long pour un outil de maintenance ou un consommable.

Considérant l'impact bénéfique du lean sur l'environnement logistique de travail reconnu par les systèmes de productions marocains comme le montre les résultats de l'étude empirique et les témoignages des deux études de cas détaillées précédemment, l'organisation de l'outillage de maintenance à travers les 5S s'avère primordiale.

Dans une vision globale, une lean chaine logistique comme l'a déclaré Bullington, peut être positionnée et préservée dans un certain ordre dans la pratique de l'outil 5S [91]. De plus, les 5S pourraient en effet être un outil facilitant le développement d'un système de gestion intégré.

Ravikumar et al montrent plus d'intérêt pour le comportement des organisations qui doivent démontrer une pratique correcte et durable des principes du lean manufacturing via la mise en œuvre des 5S étant le fondement des initiatives du lean manufacturing tel que la TPM [92].

Imai atteste que le programme kaizen est également lié aux 5S dont ils représentent l'activité cruciale et l'étape préliminaire pour la mise en place de la TPM [93].

2.2. 5SMS : Un outil adapté pour l'organisation des stocks de maintenance.

Osada assure l'importance de la mise en œuvre des 5S pour l'efficience et la maximisation de l'efficacité d'un lieu de travail [94]. Il est également considéré comme une méthodologie pour la construction et la réalisation d'un environnement de qualité organisationnelle [94], [95].

L'environnement logistique de travail de la maintenance est le contexte le plus relié à la notion de l'efficience et l'efficacité, la raison pour laquelle on propose un outil 5S adapté à ce contexte : **5SMS** (**5S** for **M**aintenance **S**tores) pour l'organisation des stocks de la maintenance (outillages, consommables, pièces de rechanges, ...). Cet outil adapté d'organisation est détaillé dans le tableau 25.

*Tableau 25. L'outil adapté **5SMS** [98].*

S	***Contexte générale***	***Contexte des stocks de maintenance***
Seiri	Trier et séparer les éléments nécessaires et non nécessaires	Conservez uniquement les éléments utiles du stock de maintenance (outils, pièces de rechange, consommables…).
Seiton	Conservez les éléments nécessaires au bon endroit pour une récupération facile et rapide.	Ordonner les éléments utiles du stock de maintenance avec la méthode CC.
Seiso	Gardez propres les éléments du stock ainsi que l'entourage.	Gardez les outils de maintenance propres. Préserver les consommables dans des conditions appropriées ainsi que les pièces de rechange et outillage.
Seiketsu	Standardiser	Standardiser l'entretien des stocks de maintenance via la propreté et le respecter de la méthode CC.
Shitsuke	Pérenniser	Pérenniser l'amélioration via la méthode PURE.

L'outil adapté 5SMS vise l'optimisation des espaces de stockage et de rangement de l'outillage, des pièces de rechanges et consommables via les cinq S renvoyant aux cinq étapes clés pour une organisation efficace préparant ainsi un environnement logistique optimal aux ressources de maintenance.

Le deuxième et quatrième S se réfèrent aux déploiements de la méthode CC (Catégorie/Caractéristiques) que nous proposons comme critère d'organisation définissant ainsi une démarche standard qui se basent sur la catégorie (visserie, cartouches, …) et les caractéristiques techniques (diamètre, longueur, plage d'intensité ou de tension du courant…) des ressources matérielles de la maintenance. La figure 36 montre l'exemple de rangement de la visserie selon les caractéristiques techniques (déployé dans le cadre du stage de recherche au sein d'un système de production œuvrant dans l'industrie de l'acier).



Figure 36. Rangement des vis 6 pans creux en se basant sur les caractéristiques techniques.

Le dernier S consacré à la pérennisation des améliorations issues de l'implantation des S précédents à travers la méthode PURE (Pick up, Use and Return Effectively : Prendre, Utiliser, Retourner Efficacement). Retourner Efficacement résume l'opération du retour d'un outil par exemple, tout en respectant la méthode CC, en le remettant à sa catégorie et son emplacement dans des boites ou rangements de même caractéristiques techniques. La figure 37 montre le résultat d'implantation des 5SMS au sein d'un système de production de l'acier (lors du stage de recherche) en organisant une partie de stock selon la méthode CC.

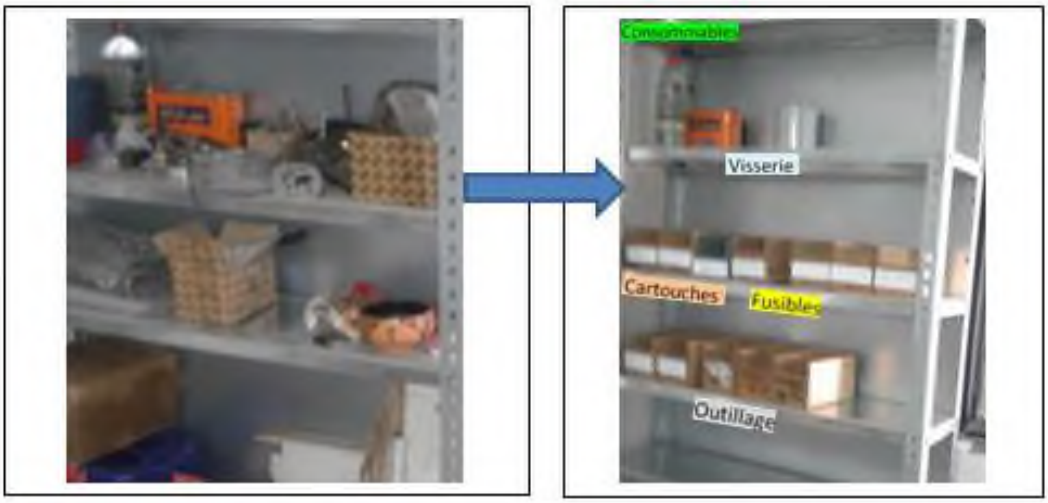


Figure 37. Etat du stock avant et après le déploiement des 5SMS.

Le déploiement de l'outil adapté 5SMS nous a permis de réduire le temps de recherche d'un outil ou d'un élément du stock témoignant le niveau d'amélioration atteinte et reflétant l'efficacité de l'organisation de l'environnement logistique de travail du facteur humain. Nous considérons ainsi le temps moyen de recherche d'un élément du stock un indicateur de base qu'on propose pour évaluer l'état d'organisation du stock.

Au bout d'une semaine nous avions pu résumer le déroulement de toutes opérations de recherche dans le stock pour calculer le **TMR** (ou MST : Mean Search Time) [158] étant le **T**emps **M**oyen de **R**echerche d'un élément (un outil, une pièce de rechange…) qui est un nouvel indicateur que nous définissons comme suit :

$$TMR = \sum_{i=0}^{N} \frac{TR}{N}$$

Avec :

TR : Temps de Recherche d'un outil ou élément du stock.

N : Nombre hebdomadaire d'opérations de recherche d'un élément du stock.

TMR : Temps moyen de recherche d'un élément du stock.

Avant l'implantation de l'outil 5SMS le TMR était égale à 15 minutes et 30 secondes et après l'implantation des 5SMS on a enregistré une diminution remarquable de ce temps en aboutissant à une valeur de TMR égale à 3 minutes et 50 secondes étant réduit de quatre fois à peu près par rapport à la valeur initiale, ce qui démontre l'efficacité de l'outil proposé.

La lutte contre les gaspillages liés à l'environnement logistique de maintenance étant primordial, ne peut seule assurer la solution définitive et efficace pour atteindre les objectifs d'amélioration continue en maintenance entre autres : la résolution efficace des problèmes liés aux équipements pour corriger les pannes actuelles, prévenir les pannes futures, et à long terme, aboutir au "0 pannes". Effectivement, l'implication du facteur humain, reste le fondement de toute stratégie d'amélioration, et en particulier dans le cadre de la philosophie lean dont l'implantation de la TPM se base sur l'implication collective de toutes les ressources. L'étude empirique menée dans le contexte industriel marocain nous a permis d'évaluer la perception des industriels sur les avantages de l'implantation du lean dans le système logistique maintenance, concluant son impact positif sur quatre domaines de bénéfices, entre autres l'environnement logistique de maintenance et la culture du facteur humain.
Ce dernier champ est considéré comme le plus difficile à aligner sur la vision de la culture lean malgré les avantages du lean reconnus et attendus. De plus, la perspective d'implication effective du facteur humain, étant une clé importante pour atteindre une performance durable, reste encore peu discutée dans le domaine de la maintenance.

Dans la perspective d'intégrer la dimension sociale dans toute démarche d'amélioration dans le cadre du système logistique maintenance, la gestion des connaissances et des expériences est l'approche la plus adéquate pour investir le système de production de tout son potentiel humain inexploité.

3. Gestion des connaissances et des expériences : vers un modèle Lean/REX

3.1. Gestion des connaissances

La notion de connaissance est souvent ignorée et sous-utilisée dans le vocabulaire des entreprises de l'industrie actuelle étant la plus riche en connaissances, la plus pauvre en alternatives efficaces de leur gestion.

La gestion des connaissances reflète un processus assurant la création de valeur en se basant sur les connaissances de l'organisation existantes sous ses différentes formes : procédures de travail, documents internes, normes, bases de données, progiciels et connaissances mémorisées dans l'esprit des employés [99].

Abordant la problématique de la gestion des connaissances, Grundstein propose un modèle empirique de cinq aspects de capitalisation des connaissances : l'identification, la préservation et la valorisation des connaissances (figure 38) [100].



Figure 38. Cycle de gestion des connaissances selon Grundstein [100]

D'autres modèles ont été discutés afin de montrer l'efficacité d'un système de gestion des connaissances. Bück propose un processus en 7 étapes (figure 39) pour activer la connaissance [101].

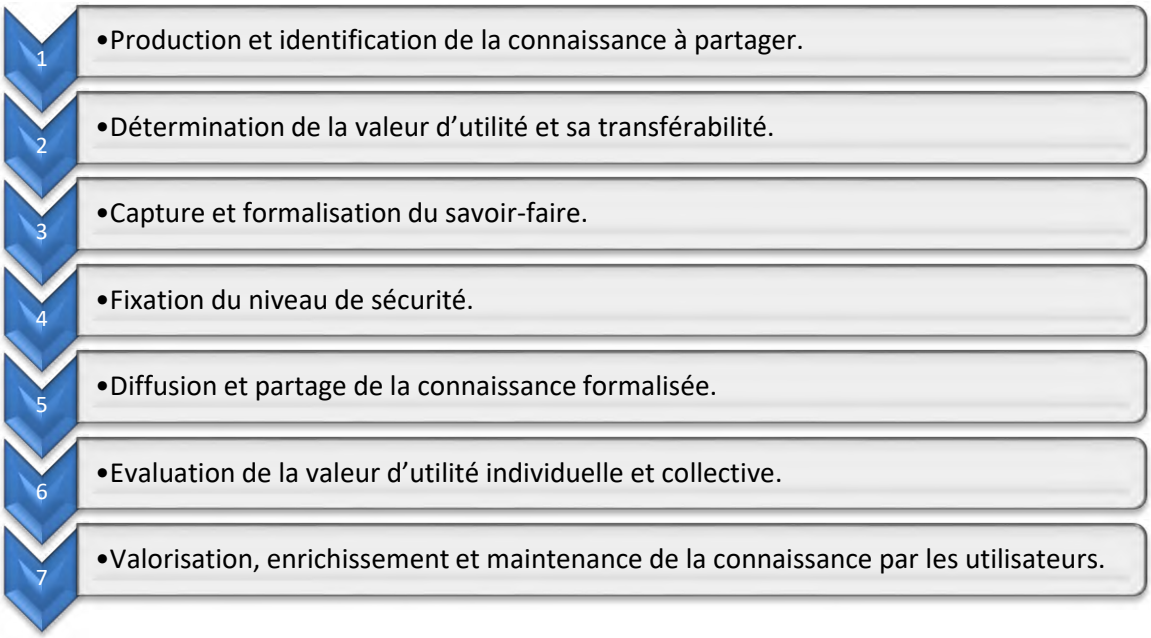


Figure 39. Processus d'activation des connaissances [101].

Différents critères ont été pris en compte dans la classification des connaissances tels que la portée, l'étendue, l'évidence et l'expression [102]. Potes-ruiz a classé les différents types de connaissances en quatre groupes en fonction des critères précédents : la connaissance procédurale ou déclarative, tacite ou explicite, interne ou externe et générale ou spécifique [103].



Figure 40. Classification des types de connaissances [102][103].

3.2. Connaissance de l'entreprise

Grundstein classifie les connaissances de l'entreprise en deux catégories principales, tacites et explicites, où il définit les connaissances spécifiques comme les capacités de gouvernance d'entreprise, d'étude, de réalisation, de vente et de support de produit. Il souligne également le savoir-faire individuel et collectif décrivant l'action de l'entreprise, les capacités d'adaptation et d'évolution en concluant que les connaissances au sein d'une entreprise sont tangibles (base de données, plans, modèles, procédures, algorithmes) ou immatérielles (capacités, secrets de travail, routines ... logique d'action non écrite individuelle et collective, connaissance de l'histoire et du contexte décisionnel ainsi que de l'environnement), les deux représentent l'expérience et la culture d'entreprise [104] [105].

Les connaissances collectives (collective knowledge (CK)) représentant l'une des ressources les plus essentielles de l'entreprise restent difficiles à localiser et à exploiter. Effectivement, la quête de formalisation des connaissances collectives est compliquée en ce qui concerne la partie omise des connaissances qui ne sont ni exprimées ni communiquées « le non-dit » comme le dit Grundstein, en plus des difficultés d'interprétation notamment en l'absence de la personne formalisatrice [104].

En d'autres termes, la connaissance emprisonnée dans les cerveaux des employés est une véritable pierre d'achoppement pénalisant tout processus d'amélioration. De plus, essayer d'extraire la connaissance collective ou de lui donner une forme utile et formelle resterait aussi loin du champ de réalisation tant que ses propriétaires resteront éloignés de tout processus de formalisation et d'exploitation de connaissances. La marginalisation des acteurs est en effet ce qui rend difficile la formalisation des connaissances collectives et leur exploitation beaucoup plus difficile.

Les méthodologies de gestion des connaissances et celles de gestion des expériences sont toutes alignées sur le chemin d'utilisation et réutilisation des connaissances. Cependant certaines différences peuvent être constatées.

Les méthodologies de gestion des connaissances classiques étant considérées comme une méthodologie standard des systèmes basés sur les connaissances consistent en un processus de capture et d'écriture : «la capture et l'écriture des connaissances que les gens utilisent pour effectuer une tâche spécifique » [106]. Ces méthodologies présentent certains points négatifs [106] :

- Difficulté d'adoption de ces modèles en raison du niveau d'abstraction élevé.
- Consommation importante de ressources humaines et de temps.
- Nécessité d'une intervention de l'ingénieur des connaissances pour guider et aider les experts à exprimer et décrire leurs connaissances.
- Faiblesse de contextualisation des connaissances extraites.
- Absence de sessions régulières d'acquisition de connaissances nécessaires à la maintenance et à la mise à jour des connaissances.

L'expérience pourrait être assimilée à une connaissance spécifique tirée d'une situation particulière de résolution de problème, elle est également définie comme « un fragment de connaissance au cours d'un processus de résolution de problème » [107].

3.3. Gestion des expériences

La notion de “retour d'expérience” ou de “leçon acquise” (experience feedback/ lesson learned) telle que nommée dans le contexte américain » [108] [109] [110] ou de « gestion de l’expérience » comme appelée généralement dans l'environnement européen [99], est étroitement liée à la notion de gestion des connaissances. Afin d'améliorer la prise de décision et la performance industrielle, il est pratique et plus facile de capturer et de stocker les expériences passées plutôt que de le faire pour des connaissances plus génériques d'experts, ce qui fait preuve de l'importance des approches basées sur l'expérience [103].

3.4. Retour d’expérience et apprentissage.

Les organisations sont dans un état d'apprentissage dynamique continu, mémorisant, exploitant, protégeant et mettant à jour leurs connaissances. Différents types d'apprentissage peuvent figurer dans une organisation [111] :

- Apprentissage individuel
- Apprentissage collaboratif
- Apprentissage organisationnel

Les trois types d’apprentissage demeurent primordiaux et dépendants chacun de l’autre et peuvent être résumés par le cadre cyclique de la figure 41.

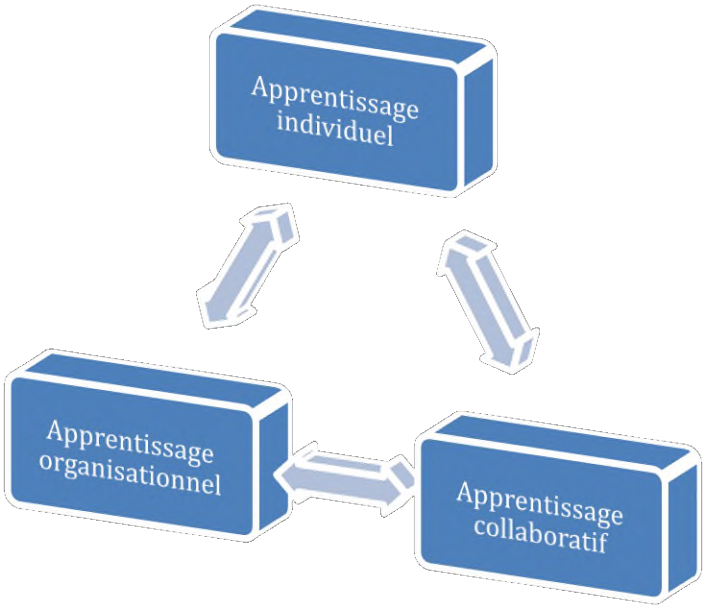


Figure 41. Le cycle d’apprentissage.

Dans notre approche, on considère le retour d'expérience et l'apprentissage deux processus indissociables et interdépendants. Le processus d'apprentissage peut être considéré comme une entrée pour le processus d'exploitation du retour d'expérience et vice versa. Les expériences pourraient être une source de connaissances spécifiques capitalisées et mémorisées pour être utilisées dans des situations ou des problèmes similaires pour en construire une base de retour d'expérience du système de production.

Plusieurs définitions ont été proposées pour Le retour d'expérience, comme celle de Bergmann considérant le retour d'expérience « *un type de gestion des connaissances qui se restreint aux connaissances issues de l'expérience, c'est-à-dire, aux connaissances spécifiques relatives à un contexte particulier de résolution d'un problème* » [99] le retour d'expérience étant pour Bergmann lié au contexte des événements négatifs (le cas d'un dysfonctionnement par exemple).

Dans le contexte américain, le retour d'expérience est considéré "une leçon *acquise* étant une bonne pratique de travail ou une approche innovante qui est capturée et partagée dans l'objectif d'encourager sa réutilisation" [112].

4. La logistique maintenance : vers un modèle Lean/REX

Les modèles théoriques élaborés dans le cadre de la recherche en gestion des connaissances/expériences dans le domaine de la maintenance étant très limités, les modèles identifiés abordent les connaissances génériques d'une expérience décrite dans des bases de données déjà existantes, permettant la sélection ou la recherche parmi les informations disponibles pour en construire de nouvelles connaissances tel que les modèles R à PC (Résonnement à Partir de Cas) ou REX/ECD (retour d'expérience/extraction des connaissance à partir de données). Là encore où ce modèle reste basé sur les connaissances extraites des donnés et le retour d'expérience ne fournit qu'une alternative de traitement de donnés issue des expériences passées, en construisant des connaissances à partir des rapports, des documents et informations déjà formalisées, l'objectif de ce modèle est de construire des connaissances à partir des cas et de règles formées par l'association et l'étude des attributs collectés des bases de données déjà existantes. Alors qu'aucun modèle n'a été identifié pour la valorisation du retour d'expérience du facteur humain de manière collective, interactive et en temps réel.

L'opérateur qui détient des connaissances explicites très utiles reste souvent non impliqué ou insuffisamment impliqué dans la résolution de problèmes liés aux équipements comme le montrent les résultats de l'étude empirique par rapport aux 3 éléments : la détection, la proposition de solutions ainsi que leur mise en place. Témoignant en particulier que l'opérateur de production étant une mémoire riche en expériences, son retour d'expérience résultant de l'interaction quotidienne avec son outil de production reste encore non exploité ou sous-utilisé pour la résolution des problèmes liés aux équipements.

Afin d'activer ce potentiel, étant jugé utile et comme décrite très importants (78,29% des répondants admettent ce niveau d'importance) l'intégration du retour d'expérience des opérateurs, nous proposons une approche qui se base sur un cadre durable. En effet, la gestion des expériences est une approche prometteuse pour enrichir les flux ascendants et descendants du système logistique maintenance. L''intégration du retour d'expérience dans les aspects managériaux est une initiative sérieuse pour activer le capital immatériel qui résume les connaissances humaines et le potentiel d'innovation qui restent souvent passifs et non exploités. Le chemin vers une logistique maintenance durable est l'implication du facteur humain dans la philosophie d'apprentissage et de partage de connaissances issues des expériences, sans négliger la réutilisation et l'adaptation de ces connaissances pour résoudre les problèmes liés aux équipements au quotidien. Or, le contexte dynamique et variable de la maintenance nous oriente vers un type de management participatif et collaboratif, voir interactif. Ce dynamisme reste la raison pour distinguer entre deux types de retour d'expérience :

- Le REX statique basé sur les connaissances issues des expériences passées figurant dans des bases de données, des bons de travail, des rapports d'intervention et des procédures documentées…
- Le REX dynamique récapitulant les connaissances tacite issues des compétences et des expériences passées et présentes vécues par la collectivité des acteurs entre autres et en particulier l'opérateurs de production qui est la ressource de rôle centrale dans l'interaction opérationnelle Homme-machine.

Dans le but d'exploiter le REX dynamique pour la résolution des problèmes liés aux équipement ainsi que pour instaurer une démarche d'amélioration effective et efficace, il est nécessaire de le situer et de l'exploiter par rapport aux différents types d'apprentissage dans une vision cyclique permettant le passage d'un type à un autre de façon graduelle construisant et partageant simultanément le REX dynamique. Ainsi, on propose le modèle pragmatique Lean/REX pour l'activation et l'exploitation REX dynamique détaillé par la figure 42.

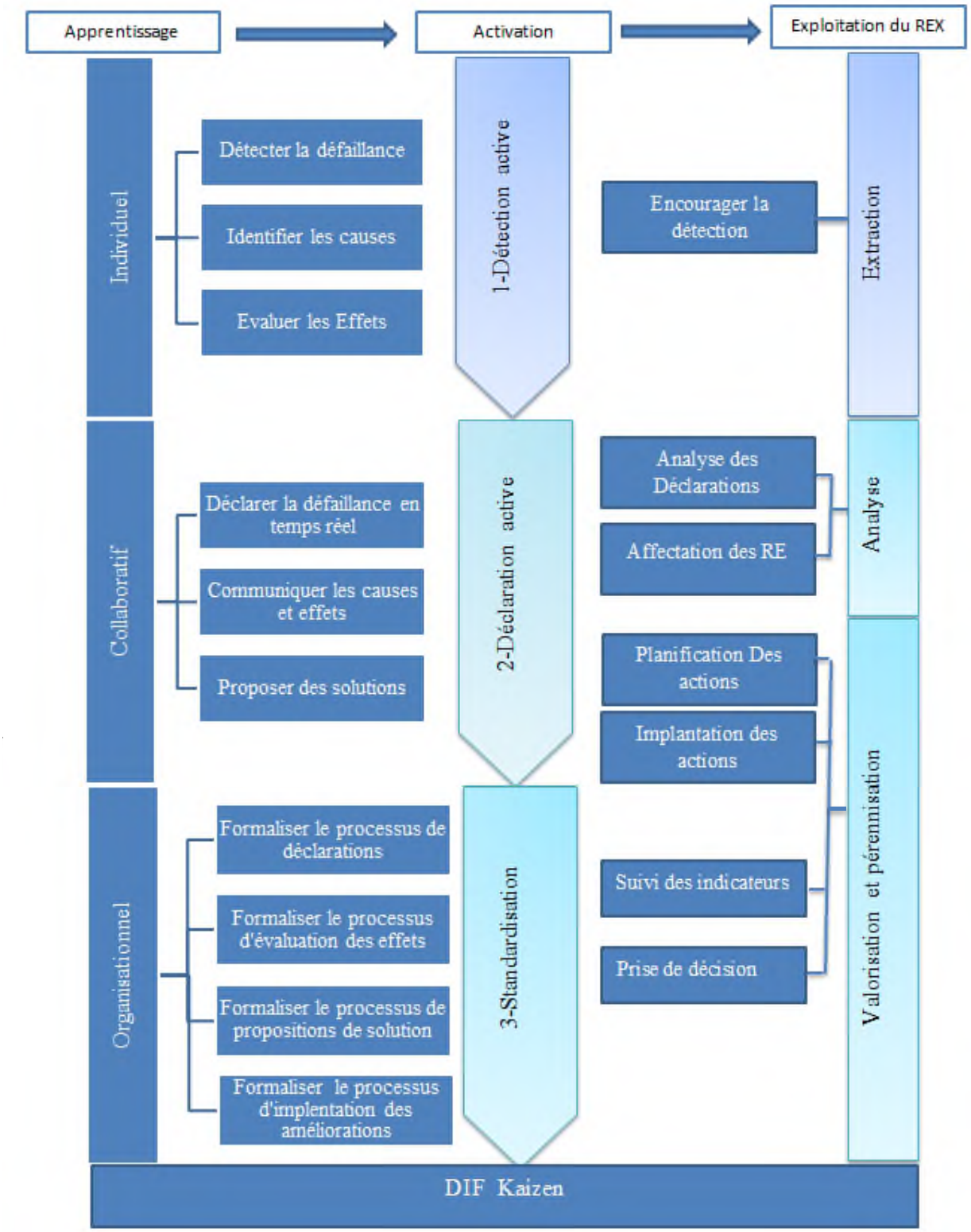


Figure 42. Modèle Lean/REX pour l'activation et l'exploitation du REX dynamique [89].

Le modèle proposé a pour objectif de permettre le déploiement du Kaizen au niveau du sous-système physique du système logistique maintenance en se basant sur le feedback de l'interaction quotidienne entre

l'opérateur et son outil de production de façon collective et ciblant une amélioration graduelle de l'état des équipements et du système principal en général. Ce type d'amélioration continue DIF Kaizen (Daily Interaction Feedback Kaizen) est principalement basé sur le REX dynamique étant le facteur clé du présent modèle qui s'appuie sur 3 piliers : l'apprentissage, l'activation et l'exploitation du REX (particulièrement le REX dynamique).

Le pilier apprentissage se compose de trois processus. Initié par le processus d'apprentissage individuel où l'opérateur de production détecte la défaillance. Le processus de détection suit 3 étapes (la détection, l'identification des causes probables de la défaillance et l'évaluation de ses effets suivant la méthode ARMDEC (Analyse Rapide des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), s'exerçant au terrain de façon rapide, qu'on propose pour activer le processus de détection au niveau opérationnel pour être utilisée de façon systématique par les opérateurs de production. Cette méthode (AMDEC) qui était souvent pratiqué dans le contexte d'un petit groupe souvent négligeant l'impaction des opérateurs de production. Le processus d'apprentissage collaboratif explicité par les trois étapes de déclaration, communication et proposition de solution permet le passage à la phase de déclaration active vue l'aspect de déclaration productive partageant des données utiles pour la réutilisation.

Le processus d'apprentissage organisationnel se résume par la formalisation des trois étapes du processus précèdent tout en formalisant l'étape d'implantation des améliorations permettant la transformation des connaissances organisationnelles à des connaissances formalisées afin de clôturer le pilier activation par la phase de standardisation.

Le pilier exploitation REX ciblant en premier lieu l'exploitation du REX dynamique s'implante via trois phases parallèles à celle du pilier activation, commençant par :

- La phase d'extraction du REX en encourageant la détection (après son activation).
- L'analyse du REX en traitant les déclarations et affectant les responsables équipement (RE). En effet, à chaque équipement un opérateur de production est désigné pour la communication des différentes connaissances issues du processus d'apprentissage équivalent à chaque phase après son activation.
- La phase valorisation et pérennisation a pour objectif de valoriser le REX dynamique extrait et analysé et ce via la planification des actions, l'implantation des actions et le suivi des indicateurs pour la prise de décision adéquate.

Le modèle Lean/REX proposé s'instaure dans le cadre d'implantation du modèle générique durable de la logistique maintenance couvrant les aspects organisationnels et managériaux tout en accordant une attention particulière à la dimension humaine et à l'organisation de son environnement logistique de travail comme le montre le modèle générique de la figure 35.

L'implantation du modèle Lean/Rex ainsi que du modèle générique ne peut aboutir à ses objectifs sans un outil pratique de mise en place et de pérennisation. Le développement de cet outil (Smart TIPM 4.0), traçant les traits d'une coordination en temps réel, fera l'objet du chapitre suivant.

III. Conclusion

Le management d'une logistique maintenance durable représenté par le modèle générique repose essentiellement sur l'organisation de ses ressources et leurs interactions, où l'environnement de travail de la logistique de maintenance représente l'atmosphère appropriée pour mettre en œuvre tout processus d'amélioration au sein du système logistique maintenance. Or il s'avère primordial de garantir la flexibilité des interactions de ce système via un environnement bien organisé auquel nous proposons un nouvel outil 5S adapté au contexte des stocks de maintenance (5SMS).

D'autre part, l'interaction du facteur humain avec l'outil de production est le moteur central des initiatives d'amélioration. Le facteur humain occupant une position vitale est considéré le levier le plus dynamique ciblé par le modèle Lean / REX qui est un nouveau modèle hybride visant l'implication des opérateurs dans le processus d'amélioration quotidien. Ce modèle ne pourrait être mis en œuvre sans un outil de mise en place garantissant la coordination de tous les acteurs en temps réel.

Chapitre 6. Développement de la plateforme Smart TIPM 4.0 pour l'implantation du modèle Lean/REX.

I. Introduction au contexte de développement de la plateforme

1. Introduction

Ce dernier chapitre clôture ses précédents en présentant un outil d'implantation du modèle lean/REX. Ainsi, le développement de la plateforme Smart TIPM 4.0 (faisant l'objet des dernières contributions indexées) reste une alternative efficace pour permettre au milieu industriel de bénéficier des résultats de recherches établis dans le cadre de cette thèse, dans le contexte spécifique de la pandémie et dans la perspective de l'industrie 4.0.

Encouragé par les résultats de l'étude empirique, témoignant la motivation de 98.68% des responsables maintenances pour le développement d'une plateforme de communication et collaboration avec les opérateurs, le développement de la plateforme Smart TIPM 4.0 s'avère l'issus de toute difficulté d'implantation de l'esprit de la TPM ainsi que de toutes démarche d'amélioration ciblant le sous-système physique de la logistique maintenance.

2. Cadre de l'industrie 4.0

Dernièrement, à l'instar de l'entreprise ambidextre (associant la capabilité de développer des projets innovants et routiniers simultanément), l'entreprise lean (augmentant la réactivité ainsi que le niveau de performance via la lutte contre les gaspillages), l'entreprise agile, puis durable, l'industrie 4.0 [113] s'approprie tous les bénéfices des formes précédentes à travers la modernisation des outils industriels par le numérique [114] [115] [116] [117].

Hermann et al affirment que l'intégration de "l'internet de tout" dans la chaine de valeur industrielle a constitué le fondement de la révolution industrielle suivante appelée "industrie 4.0" [116]. Ce terme a apparu en 2011 qualifiant une initiative allemande nommée "industrie 4.0" regroupant les représentants de plusieurs entreprises, académiciens et politiciens dans l'objectif de répondre aux enjeux de compétitivité de l'industrie allemande [118].

Le cadre industriel actuel étant plus exigeant en termes de performance, le besoin d'adaptation, de flexibilité et de transparence à tous les niveaux des systèmes de la chaine logistique, s'exprime clairement en l'incitant pour devenir plus "intelligente". [114]

Hermann et al ont identifié quatre principes de conception de l'industrie 4.0: l'interconnexion, la transparence de l'information, la décision centralisée et l'assistance technique [116].

Le recours aux technologies d'information et de communication pour la création des solutions adaptées aux systèmes de production est l'outil stratégique de l'industrie 4.0 afin d'assurer concrètement la pratique de ses principes ainsi que pour l'implantation de tout modèle d'amélioration répondant aux besoins de l'industrie actuelle et future.

3. Contexte de la pandémie COVID-19

COVID-19 qui a été précédemment connu sous le nom de [2019-nCoV] [119] ayant été diagnostiqué pour la première fois en Chine, s'est rapidement transformé en une pandémie avec la déclaration des cas confirmés dans d'autres pays.

La situation pandémique du COVID-19 se développant au Maroc depuis le 02 mars 2020 avec l'apparition du premier cas confirmé, a manifesté le besoin de l'annonce de l'état d'urgence sanitaire déclarant le confinement ainsi que d'autres mesures sanitaires comme outils principales de lutte contre la propagation du Verus.

La distanciation physique entre les employés des unités industriels reste l'une des mesures les plus importantes pratiquée afin d'éviter la contamination et l'apparition des focaux. Cette distanciation justifie le recours aux solutions de travail à distance ou encore de collaboration à distance permettant le respect de cette mesure en communiquant à partir de locaux internes différents au sein de l'entreprise ou même externes. Effectivement, l'Organisation Mondiale de la Santé affirme que "Les stratégies de télétravail et de téléenseignement dans différents contextes démontrent l'innovation et le rôle de la technologie dans le soutien de la continuité des affaires et le maintien des liens sociaux au sein des familles et des communautés" [120].

II. Introduction à la plateforme Smart TIPM 4.0

1. Concept de la plateforme

Le développement d'une plateforme de collaboration à distance, en temps réel pour l'implantation du modèle Lean/REX proposé s'instaure dans le contexte de l'industrie 4.0 fournissant une solution technologique faisant partie des Nouvelles Technologie d'Information et de Communication (NTIC) respectant et encourageant la mesure de distanciation physique entre les employés des systèmes de production pour la lutte contre le COVID-19.

La conception et le développement de la plateforme s'inscrit dans le cadre de l'implantation du modèle Lean/REX pour l'activation et l'exploitation du retour d'expérience dynamique des acteurs en maintenance et s'ouvrant sur les acteurs de production impliquant en particulier l'opérateur de production détenant le fruit de ses interactions quotidiennes avec son équipement.

Cette plateforme représentant la facette pratique du modèle proposé s'avère un outil innovant permettant la mise en place de toute stratégie ou démarche d'amélioration en maintenance de façon opérationnelle quotidienne. Ce qui permet une implantation aisée et efficace de la TPM nécessitant comme élément clé de réussite, l'implication des opérateurs au quotidien.

L'implication des opérateurs pour la résolution des problèmes liés aux équipements restant encore insuffisante au sein des systèmes de production marocains comme le montrent les résultats de l'étude empirique, demeure une contrainte freinant les initiatives d'implantation de la TPM en général et particulièrement de la mise en place de ses deux premiers piliers (**la maintenance autonome/ Jishu Hozen et** l'a**mélioration au cas par cas/ Kobetsu Kaizen).**

2. Appellation et positionnement par rapport au système logistique maintenance

La plateforme Smart TIPM 4.0 (TIPM : Total Interactive Productive Maintenance) inspire son appellation de la culture de résolution des problèmes tout en produisant et améliorant la disponibilité des équipements en impliquant collectivement les opérateurs comme ciblé par la TPM et de manière interactive.

La plateforme Smart TIPM 4.0 œuvrant au niveau du sous-système d'information et de communication de maintenance (MICS) étant le sous-système central du système logistique maintenance, est une alternative pratique permettant la mise en place de l'amélioration continue au niveau du sous-système physique de maintenance (MPS), remontant les flux d'information de terrain aux sous-système de management stratégique de maintenance (MSMS) et constituant un outil d'aide à la décision générant un ensemble d'indicateurs utiles pour la prise de décision.

La plateforme permettant l'implantation des deux premiers piliers de la TPM en particulier et de la TPM en général de façon interactive dans l'objectif d'encourager la collaboration entre les acteurs en temps réel répandant ainsi à l'enjeu de l'usine connectée via un système logistique maintenance connecté.

III. Modélisation UML de la plateforme

1. Introduction

Le cadre d'application de la modélisation orientée objet constitue une technologie prometteuse pour définir les traits de conception et de mise en œuvre des logiciels éprouvés afin de réduire leurs coûts et améliorer

leur qualité [121]. Les principaux avantages de la programmation orientée objet est sa flexibilité basée sur le concept d'objets interagissant entre eux facilitant le développement des systèmes. Ces avantages proviennent ainsi de la modularité, de la réutilisabilité, de l'extensibilité et de l'inversion du contrôle qu'ils fournissent aux développeurs [121].

Dans le cadre de la modélisation étant un concept de large étendue en génie logiciel, depuis le milieu des années 1990, l'UML (Unified Modeling Language) est devenu la norme de modélisation la plus répondue pour la modélisation des systèmes logiciels [122]. L'UML est un langage normalisé fournissant une représentation graphique efficace pour une solution objet répondant aux besoins de modélisation aux différents niveaux de conception.

2. Diagrammes de cas d'utilisation

La première étape de conception du système requière un outil UML d'expression, d'analyse et de recensement fonctionnel du système. Le diagramme de cas d'utilisation est donc la première étape d'analyse du système fournissant une représentation du point de vue utilisateur du système.

Dans une première étape, pour modéliser notre plateforme du point de vue utilisateurs, on a conçu trois diagrammes de cas d'utilisations expliquant le fonctionnement global de la plateforme entre autres les différents acteurs interagissant et types d'information d'actions.

Un cas d'utilisation est une entité discrète représentant un comportement ou une interaction entre un acteur et le système.

2.1. Diagramme de cas d'utilisation "Administrateurs"

Ce premier diagramme montre les différents cas d'utilisation des deux types d'administrateurs du système. Le second type Super Admin hérite tous les cas d'utilisation d'un administrateur et réalise un autre cas d'utilisation propre à lui qui est la gestion des administrateurs.

Avant toute interaction interne chaque administrateur accède à sa session via un cas d'utilisation "connexion" comme le montre la figure 43.

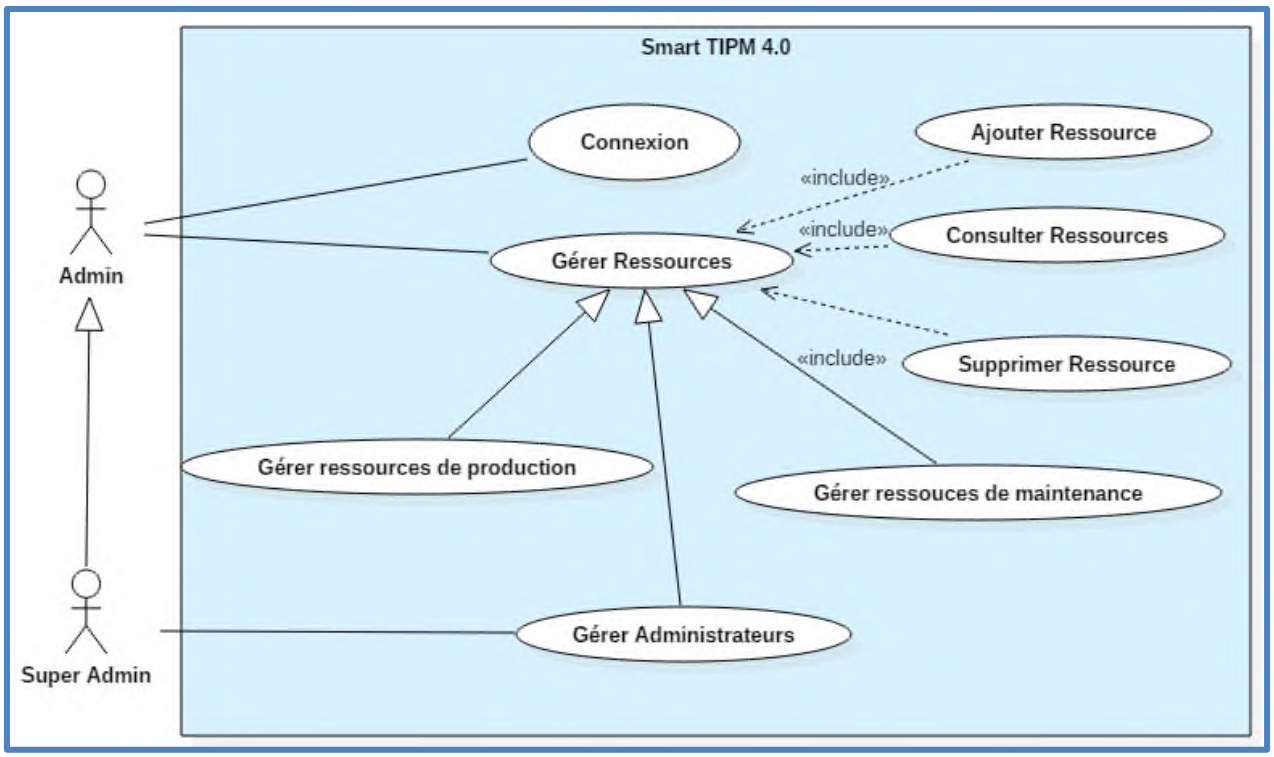


Figure 43. Diagramme de cas d'utilisation Administrateurs.

2.2. Diagramme de cas d'utilisation "Opérateurs"

Ce diagramme de cas d'utilisation décrit le comportement d'un opérateur qui est un acteur fictif dont les deux types d'opérateurs héritent le cas d'utilisation "connexion". Le responsable poste qui est un opérateur de production affecté à un poste et chargé de la déclaration des défaillances suivant la méthode ARMDEC (Analyse Rapide des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité) pour recenser les causes et effets de chaque défaillance et les évaluer en donnant à chaque effet un poids (de 1 à 4) par rapport à sa gravité (G), à sa fréquence d'apparition de la défaillance (F), et sa capacité de détection de la défaillance (D). Cette Méthode est une version rapide de L'AMDEC moyen de production destinée pour être pratiquée par les responsables poste décrivant les causes et effets de manière brève fournissant le maximum d'information avec le minimum des mots clés de terrain.

Le responsable poste étant une ressource en interaction quotidienne avec l'outil de production, constitue un potentiel d'innovation prometteur qu'on a impliqué via le cas d'utilisation "Déclarer proposition ".

Ainsi la phase de déclaration active est explicitée via l'ensemble des cas d'utilisation du responsable poste. Le rôle de l'opérateur de maintenance est de confirmer les propositions de solution pour les défaillances déclarées après la planification des interventions et son affectation à l'équipement défaillant via un planning d'intervention (par le responsable maintenance) comme il se charge de confirmer l'exécution de l'intervention en renseignant sa date et sa durée, ce qui est représenté dans le diagramme de la figure 44.

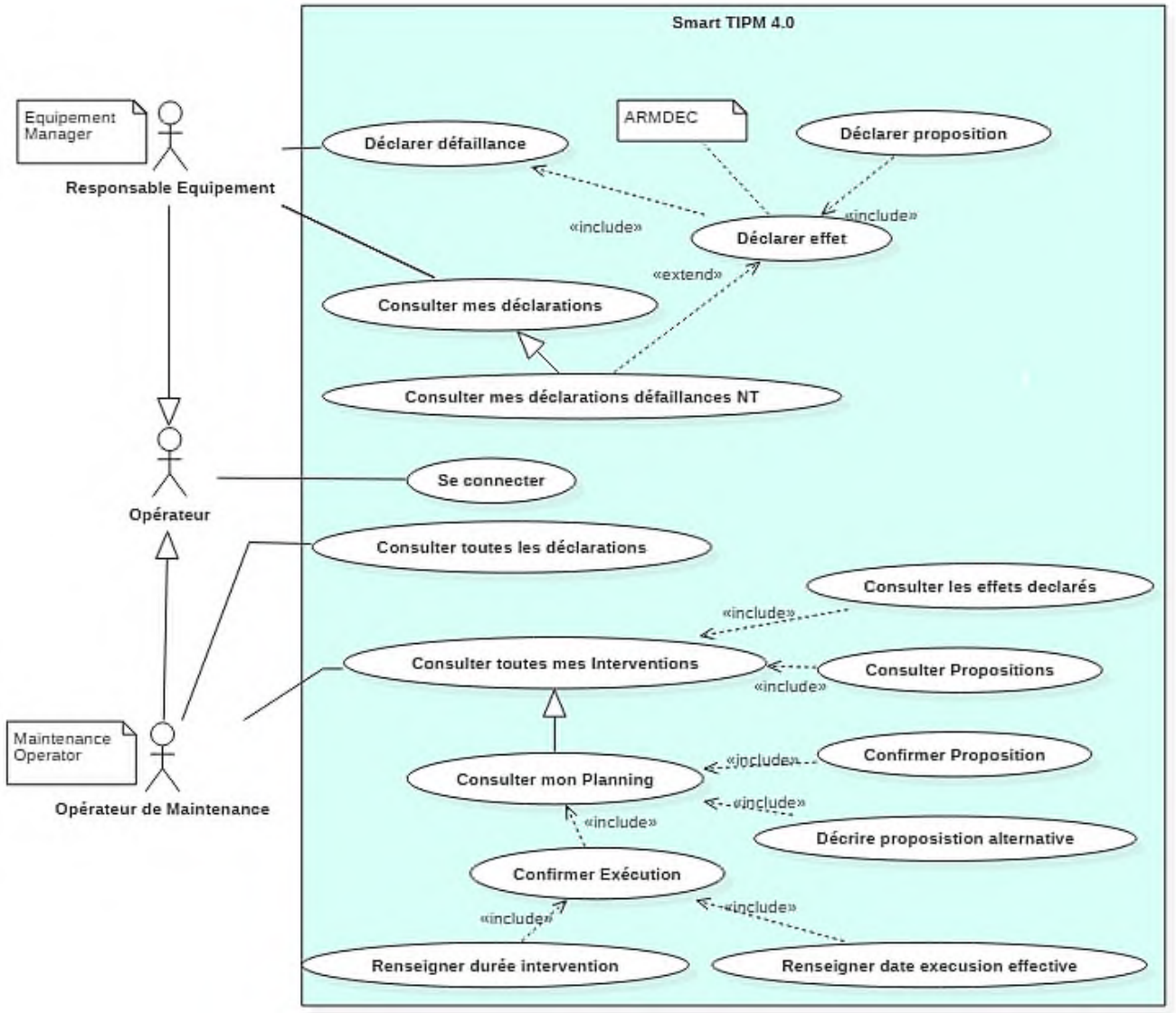


Figure 44. Diagramme de cas d'utilisation "Opérateurs".

2.3. Diagramme de cas d'utilisation "Responsables"

Le diagramme de cas d'utilisation "Responsables" décrit tous les cas d'utilisation possibles du responsable maintenance, responsable production reflétant leurs interactions dans le cadre de la plateforme Smart TIPM 4.0.

Le responsable maintenance et le responsable production partagent le cas d'utilisation connexion via un acteur fictif "Responsable" et interagissent à travers des cas d'utilisation communiquant certaines informations via la plateforme.

Le responsable maintenance gère les équipements, les composants critiques de chaque équipement, les affectations des responsables postes. Il gère aussi les défaillances déclarées par les responsables postes ainsi que l'ensemble des interventions.

La plateforme offre aussi la possibilité de suivi des indicateurs TIPM (***Total Interactive Productive Maintenance*** indicators), à travers un tableau de bord d'indicateurs DIF (***Daily Interaction Feedback*** indicators) fournissant un ensemble de nouveaux indicateurs reflétant la performance du système liée à la gestion du retour d'expérience constituant ainsi une image sur l'interaction quotidienne Homme-machine tout en permettant au responsable maintenance le calcul et le suivi du TRS étant l'indicateur classique de la TPM.

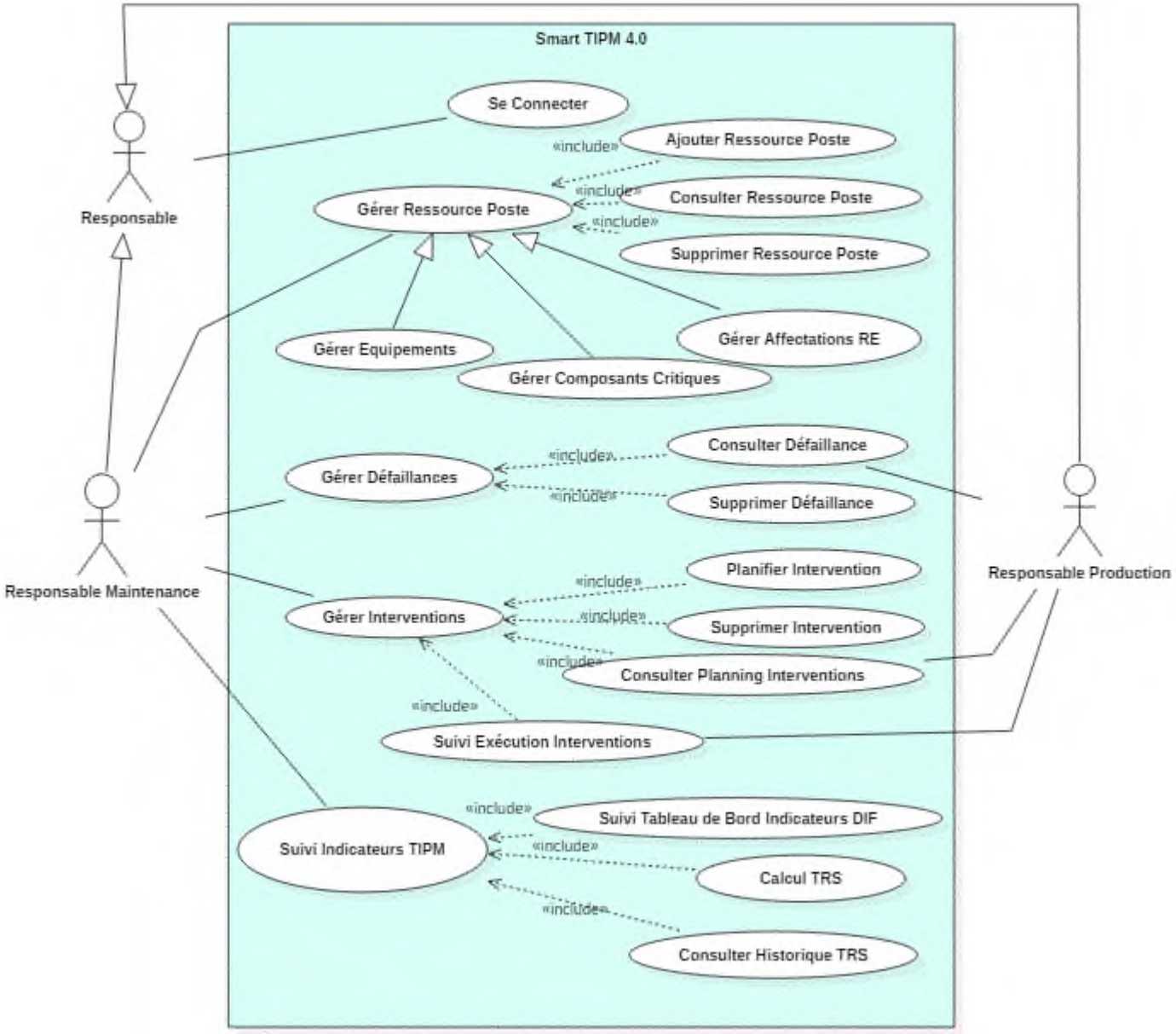


Figure 45. Diagramme de cas d'utilisation "Responsables".

3. Diagramme de Classe de la plateforme Smart TIPM 4.0

Le diagramme de classe s'avérant l'outil le plus important pour la modélisation et l'implantation d'une application donnant une vue interne du système regroupant ses différents objets et interactions.

La plateforme Smart TIPM 4.0 est modélisée par le diagramme de classe de la figure 46 représentant les différentes classes : Responsables maintenance, Equipements, Défaillances, Administrateurs ainsi que les différentes associations les reliant ainsi que leurs multiplicités.

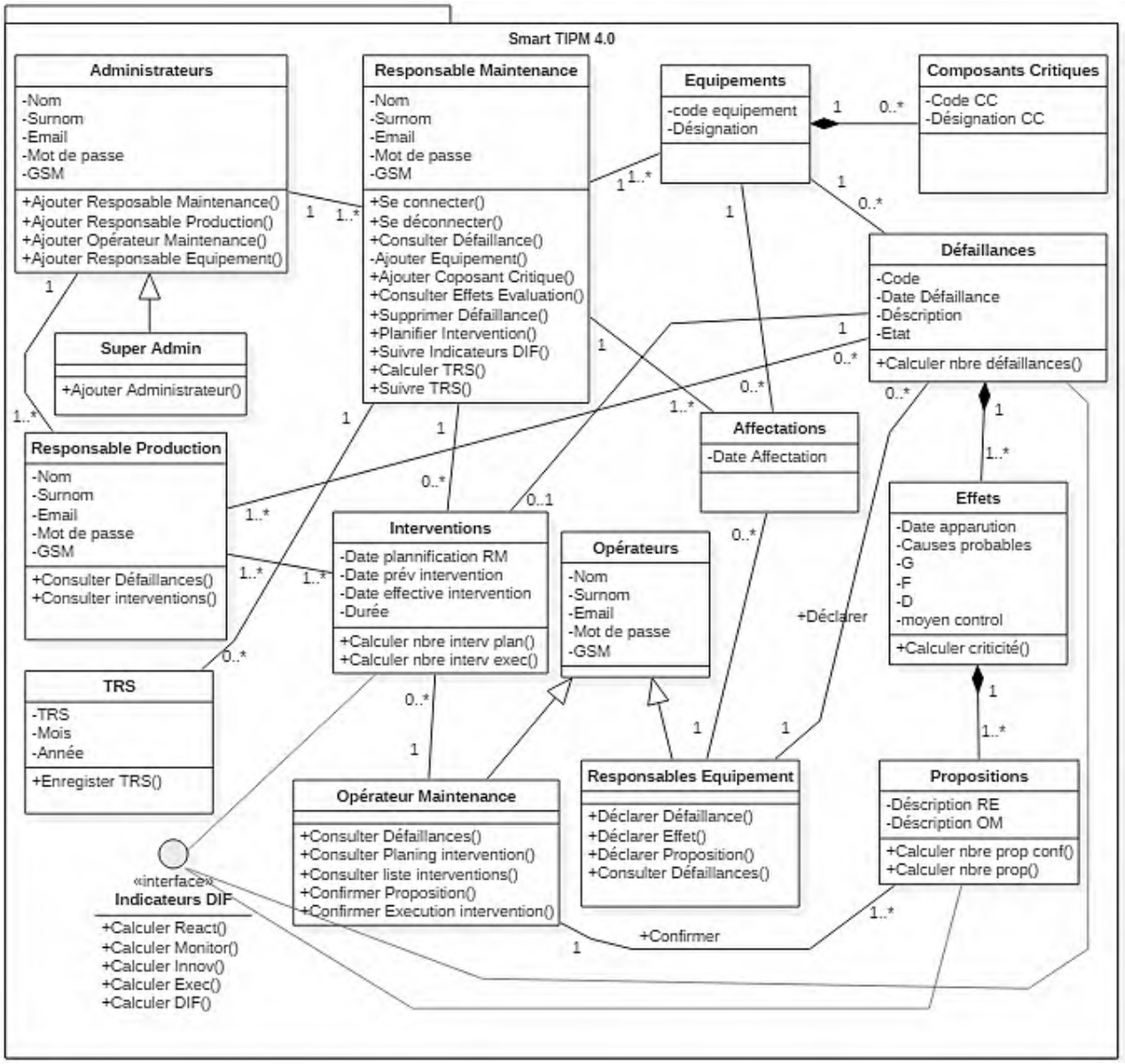


Figure 46. Diagramme de classe de la plateforme Smart TIPM 4.0.

4. Conception des indicateurs TIPM

La TPM comme définit par Seiichi Nakajima est une "approche innovante de la maintenance qui optimise l'efficacité de l'équipement, élimine les pannes et favorise la maintenance autonome par les opérateurs via des activités quotidiennes impliquant la totalité de la main d'œuvre" [64]. A l'instar de la TPM, la TIPM est une plateforme et avant tout un standard pour impliquer la totalité des ressources de manière interactive et quotidienne.

Le rôle de la TPM est de maximiser l'efficacité et la productivité de l'équipement [155], alors que le rôle de la TIPM est de maximiser l'efficacité technico-humaine de l'interaction Homme-machine dans une alternative de faire converger la performance du facteur humain et des équipements vers la performance globale du système principal (système de production).

Afin d'atteindre cette objectif La plateforme TIPM fournit une base de gestion de la maintenance et de coordination à distance tous en fournissant deux types d'indicateurs :

- Les indicateurs DIF (***Daily Interaction Feedback*** Indicators) qui sont de nouveaux indicateurs permettant d'évaluer la performance des interactions du facteur humain et sont ainsi considérés un moyen pour l'évaluation du niveau d'activation et d'exploitation du REX dynamique.
- L'indicateur TRS qui est l'indicateur synthétique clé de la TPM pour mesurer l'efficacité de productivité des machines.

4.1. Conception des indicateurs DIF

Les indicateurs DIF ou indicateurs d'interaction, définis pour la première fois dans le cadre de la mesure de l'état du système principal en termes de performance interactionnelle reflétant l'implication du facteur humain.

L'indicateur principal **DIF** est un indicateur synthétique qui reflète une performance interactionnelle basée sur trois taux clés :

- Le **Taux Monitor** représentant le niveau de vigilance, voire de contrôle du système, évaluant la réactivité aux déclarations des défaillances ainsi que le niveau de planification. Le calcul de cet indicateur se base sur le taux moyen de réactivité et le taux de planification.
- Le **Taux Innov** étant un indicateur pour mesurer le niveau d'innovation du système en se référant aux propositions utiles déclarées par les responsables postes sur la plateforme et qui ont été confirmées par l'opérateur de maintenance.
- Le **Taux Exec** fournit une image de l'évolution d'exécution des interventions planifiées.

Tableau 26. Indicateurs d'interaction.

Indicateurs	Désignation	Formule de Calcul
MReact	Taux moyen de réactivité (Mean Reactivity Rate)	$\text{MReact} = \frac{\sum_{i=1}^{n} React}{n}$ Avec $React = \frac{100}{Diff\ Days}$ et $Diff\ Days = (MM\ planing\ date - Failure\ Date) + 1$
Plan	Taux de Planification (Planning Rate)	$\text{Plan} = \frac{\text{nbre d'interventions planifiées}}{\text{nbre de défaillances déclarées}} \times 100$
Monitor	Taux de contrôle (Monitoring Rate)	$Monitor = \frac{(MReact + Plan)}{2} \times 100$
Innov	Taux d'innovation (Innovation Rate)	$Innov = \frac{\text{Nbre de propositions utiles}}{\text{Nbre total de propositions}} \times 100$
Exec	Taux d'exécution (Execution Rate)	$\text{Exec} = \frac{\text{Nbre de propositions exécutées}}{\text{Nbre de propositions utiles}} \times 100$
DIF	Indicateur d'interaction quotidienne (Daily interaction Feedback)	$\text{DIF} = \frac{(\text{Monitor} + \text{Innov} + \text{Exec})}{3}$

Ces indicateurs (récapitulés dans le tableau 26) sont développés sous forme d'un tableau de bord permettant le suivi des améliorations pour une prise de décision efficace basée sur une image fidèle à la réalité du sous-système physique du système logistique maintenance.

Le calcul des indicateurs s'effectue automatiquement via la plateforme qui s'alimente des différentes interactions entre les acteurs affichant ainsi ses indicateurs au fur et à mesure de l'évolution des interactions (déclarations de défaillances, planifications, évaluations de l'utilité des propositions...).

La partie du code montrant le calcul du dernier indicateur DIF étant basé sur les autres indicateurs, est représentée par la figure 47.

```
if ($i!=0) {echo "".floorp((((floorp((((($trm/$i)+(($ip/$tf)*100))/2),2))+floorp((($nb/$nbs)*100),2)+floorp((($rr['nb']/$ip)*100),2))/3),2)."%";
$dif=floorp((((floorp((((($trm/$i)+(($ip/$tf)*100))/2),2))+floorp((($nb/$nbs)*100),2)+floorp((($rr['nb']/$ip)*100),2))/3),2);}
else echo "No failure has been declared this month";
?></td>
<td align="center" class="classdiflevel">
<?php
if ($i!=0){
    if( $dif<=60) echo "Low <br>";
    else if($dif<=70) echo "Acceptable, To be improved <br>";
    else if($dif<=80) echo "Good<br>";
        else  echo "Excelent<br>";
          }
else  echo "A control visit to the shop is required!";
```

Figure 47. Extrait du code php et html de calcul et d'affichage de l'indicateur DIF.

4.2. Calcul du TRS

Le taux de rendement synthétique TRS représentant un rendement composite basé sur trois composantes :

- La disponibilité de l'équipement
- La performance en régime normale
- La qualité du produit fourni

Le TRS est alors calculé par le produit des trois taux [156] :

$$TRS = \text{Taux de disponibilité} \times \text{Taux de performance} \times \text{Taux de qualité}$$

La plateforme permet aussi le calcul du TRS par le responsable maintenance et d'enregistrer l'historique des TRS calculés dans la mesure de localiser les points faibles et en prévoir les améliorations adéquates.

5. Développement des interfaces de la plateforme Smart TIPM 4.0

5.1. Interface de connexion

La plateforme offre une première page de connexion à travers laquelle les acteurs peuvent s'authentifier en utilisant leurs login et mot de passe pour accéder chacun à sa session.



Figure 48. Interface de connexion de la plateforme Smart TIPM 4.0

5.2. Menu de l'administrateur

La gestion de la plateforme se fait à travers un compte Administrateur ou un "super-administrateur" (Super admin), ce deuxième est un administrateur disposant de la possibilité de gestion des administrateurs en plus de tous les autres rôles d'un administrateur comme le montre la figure 49.

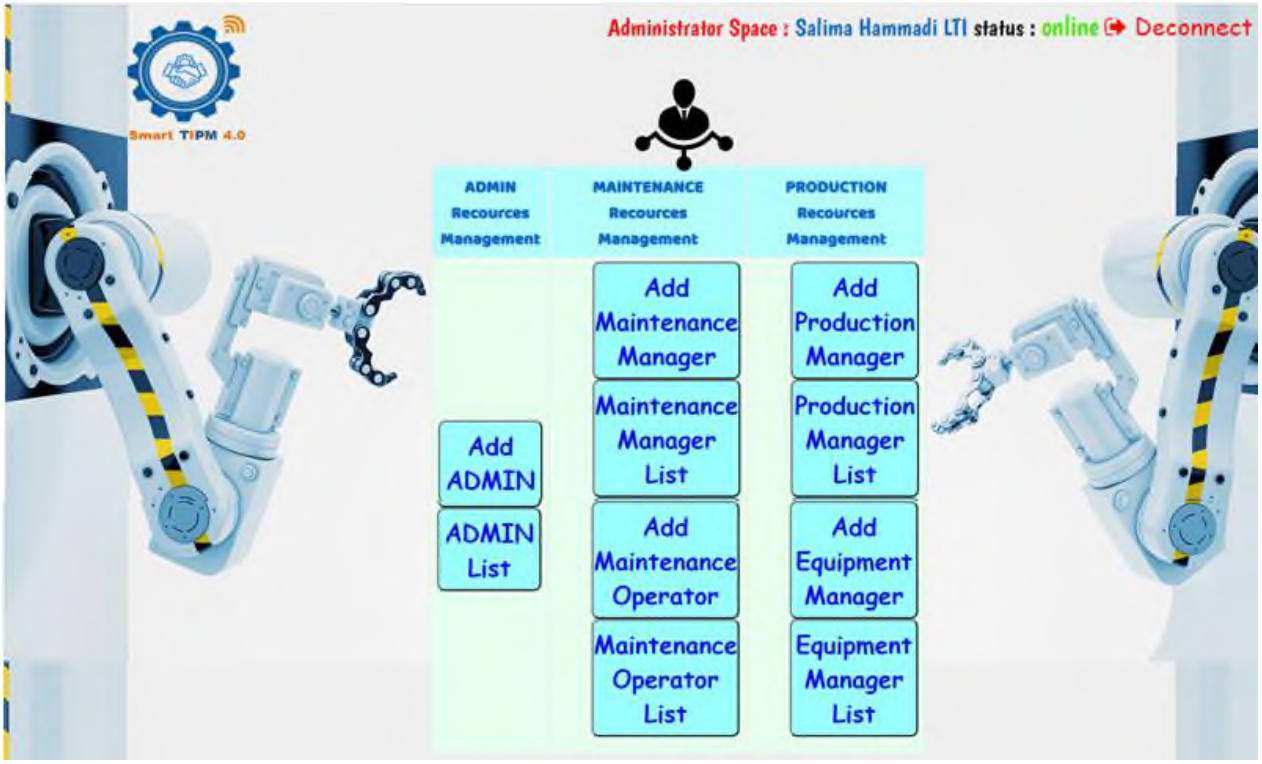


Figure 49. Menu administrateur (cas d'un Super Admin).

5.3. Interfaces du responsable poste

Le processus d'interaction commence par une déclaration d'un responsable poste qui est un opérateur de production après sa connexion.

La figure 50 montre le menu du responsable poste "Darif" de la section "Emaillage" étant identifié via son login et mot de passe initiant ainsi sa session.

Le menu du responsable poste (Equipment Manager) offre deux types d'opérations regroupant trois possibilités : déclarer activement une défaillance (avec la méthode ARMDEC), consulter les défaillances concernant le poste ou les postes auxquels il a été affecté.

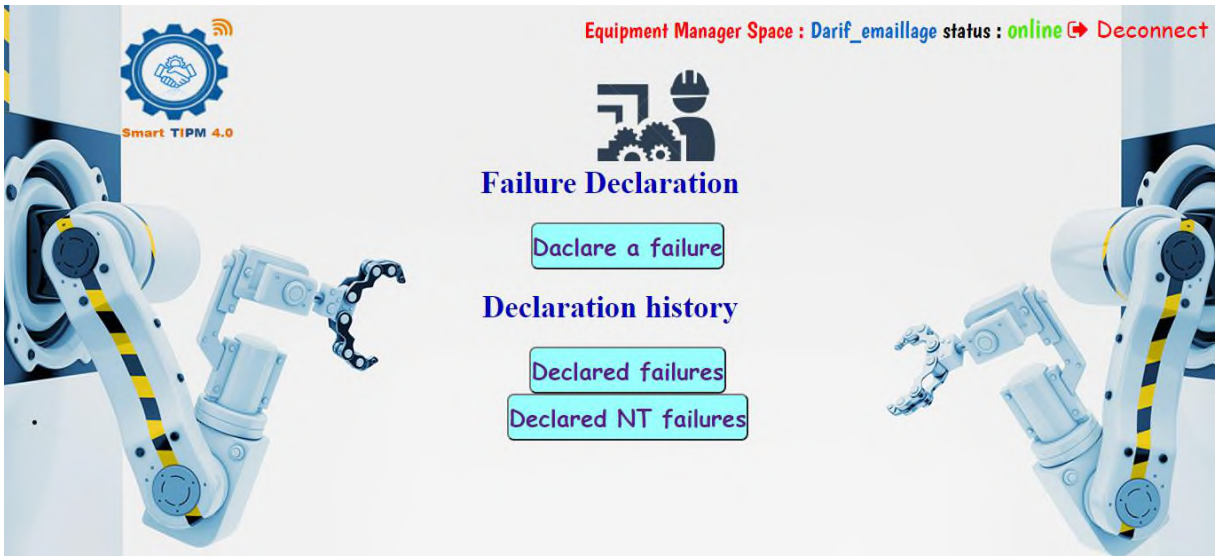


Figure 50. Menu Responsable poste (Equipment Manager).

La déclaration active passe par trois étapes (la déclaration de la défaillance, l'évaluation de ses effets et la proposition de solutions.

La déclaration est initiée via une description brève de la défaillance renseignant les champs suivants :

- Le code de la défaillance composé des éléments du code de l'équipement suivi d'un numéro de défaillance.
- La date de défaillance déclarant la date de la première détection de la défaillance.
- La Description : représentant une description technique brève résumant les aspects de la défaillance via des mots techniques renvoyant à l'organe ou opération affectée par la défaillance.

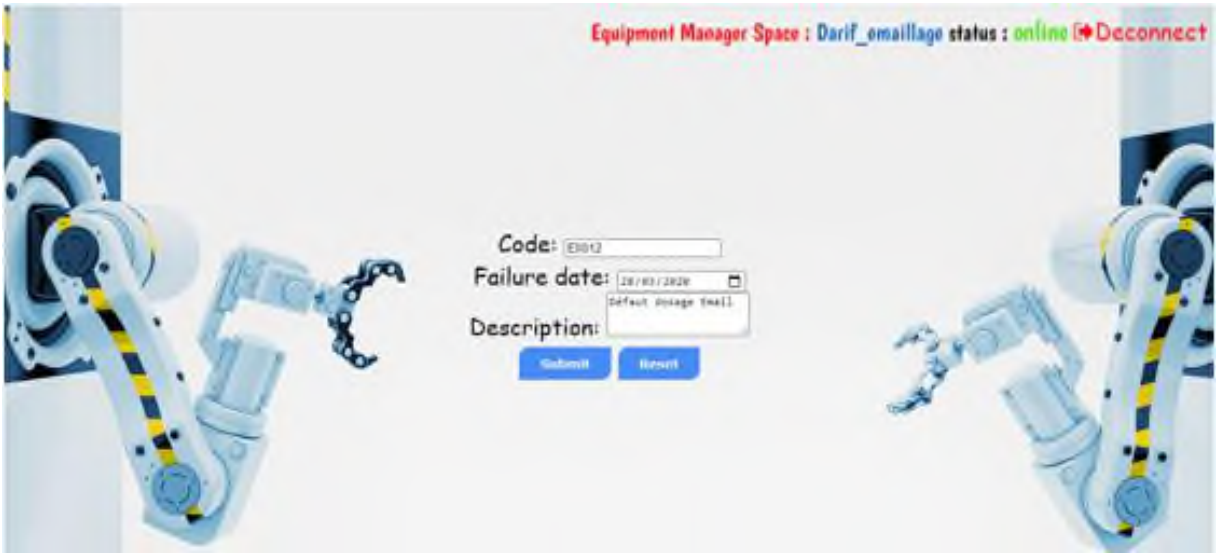


Figure 51. Interface de déclaration de défaillance.

Une fois le responsable poste appuie sur le bouton d'envoi "Submit", une autre interface s'affiche pour évaluer les effets de la défaillance (figure 52).

L'effet et sa cause sont décrits via des mots clés précis commençant par l'effet puis sa cause probable étant tous les deux séparés par un slash (/).

L'évaluation de la gravité, la fréquence d'apparition et la capacité de détection se fait à travers trois indices : l'indice de gravité (G), l'indice de fréquence (F) et l'indice de détection (D).

L'évaluation de ses effets se fait via le choix entre quatre niveaux représentés par un poids de 1 à 4. La gravité par exemple peut être qualifiée de :

- Mineure (G=1)
- Moyenne (G=2)
- Majeure (G=3)
- Importante (G=4)

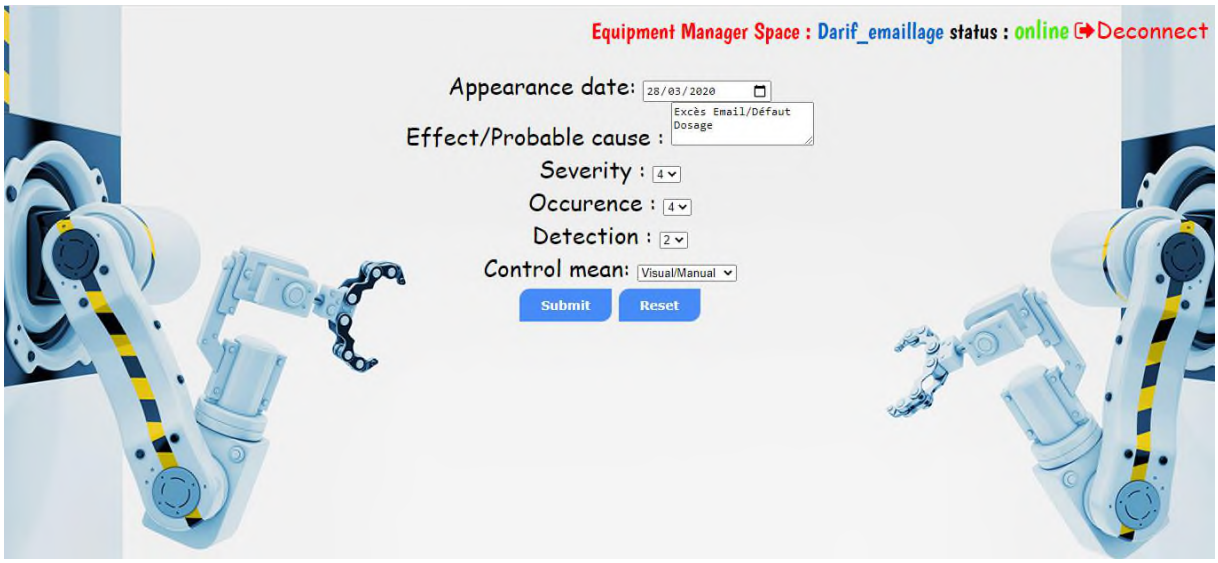


Figure 52. Interface évaluation des effets.

Après la confirmation de l'envoi, les effets évalués sont résumés dans le tableau de l'interface suivante.

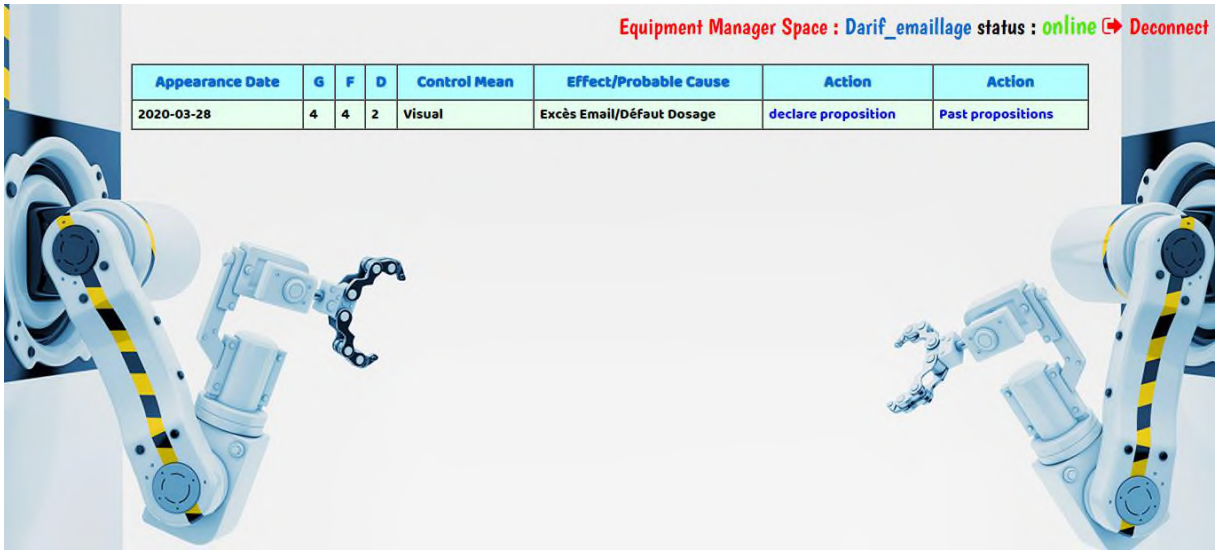


Figure 53. Interface tableaux des effets déclarés.

Cette dernière interface peut être aussi accédée via la liste des déclarations (de défaillance) non traitées (auxquelles le responsable maintenance n'a pas encore planifié d'interventions).

L'étape de proposition de solution est réalisée en appuyant sur le bouton d'action "declare proposition" (déclarer proposition), une interface s'affiche pour décrire la proposition par le responsable poste.

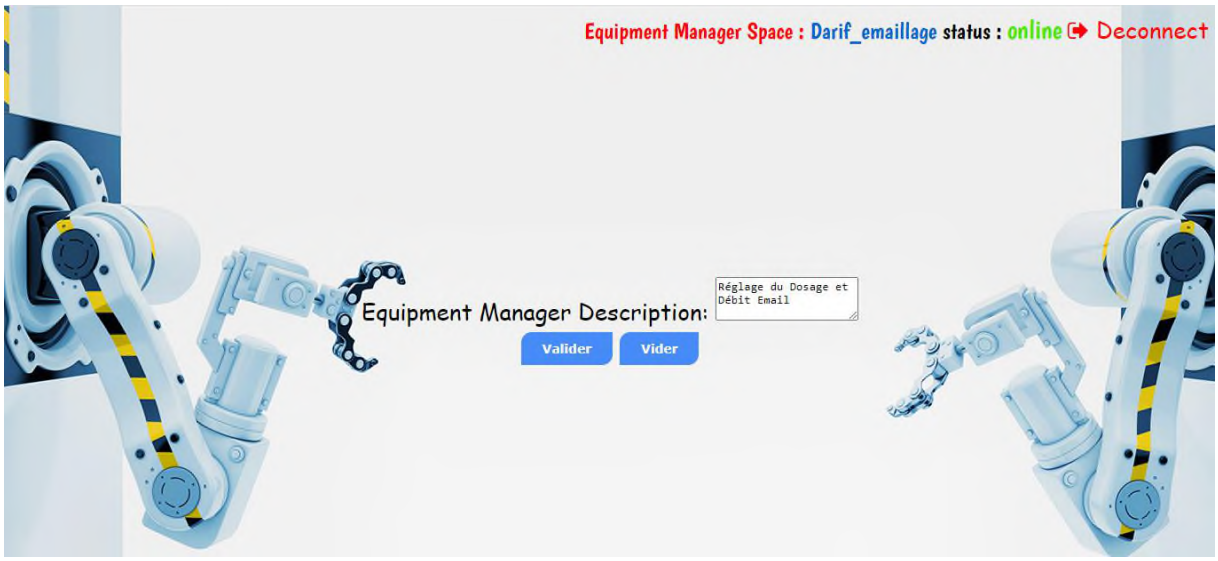


Figure 54. Interface de proposition de solution.

Là le processus de déclaration active se termine.

La consultation des propositions peut être effectuée via le bouton "past propostions". Ainsi l'interface affichant la liste des propositions peut être consultée (figure 55).

L'ensemble des déclarations (traitées ou non-traitées) sont regroupées via une interface accédée via le bouton "declared failures" du menu principal du responsable poste.

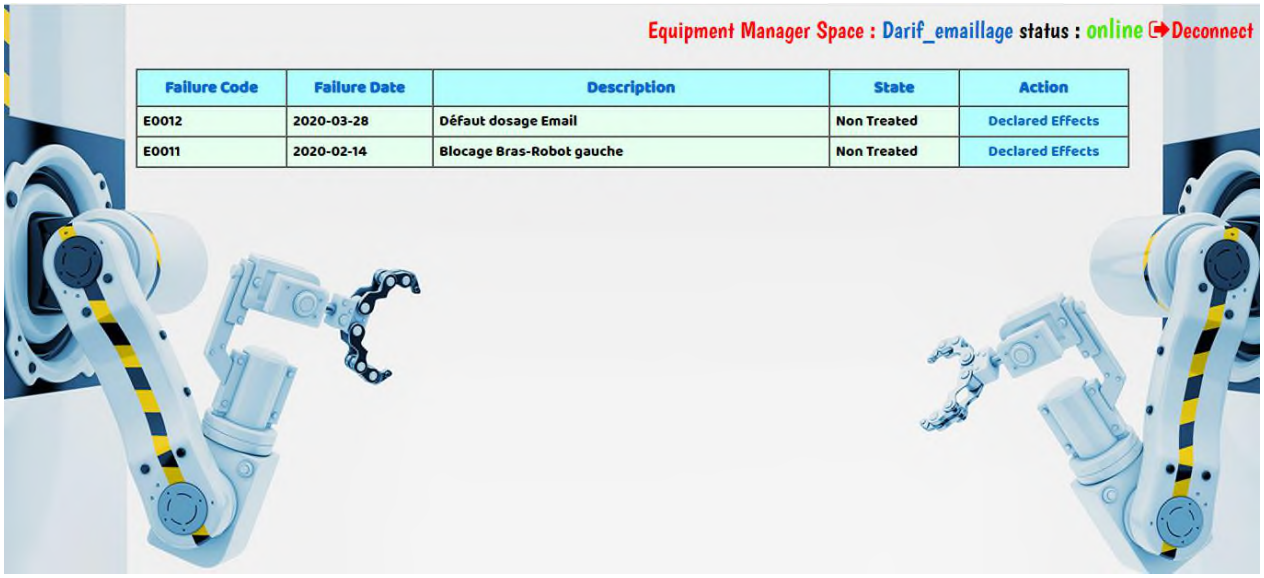


Figure 55. Interface des défaillances déclarées par le responsable poste.

5.4. Interfaces du responsable maintenance

La connexion du responsable maintenance se déroule à travers la même interface de connexion utilisant son login et mot de passe. La concrétisation des différents cas d'utilisation du responsable maintenance est réalisée via le menu principal du responsable maintenance illustrée par l'interface de la figure 56.

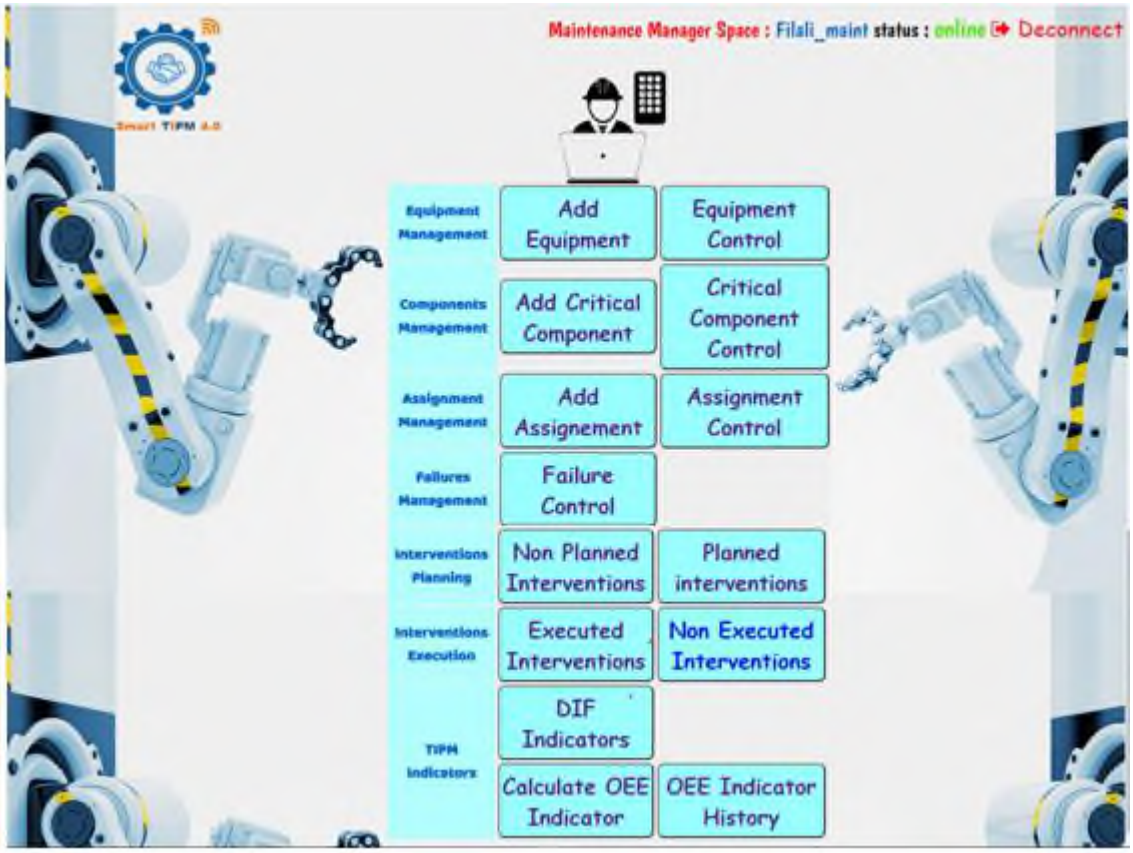
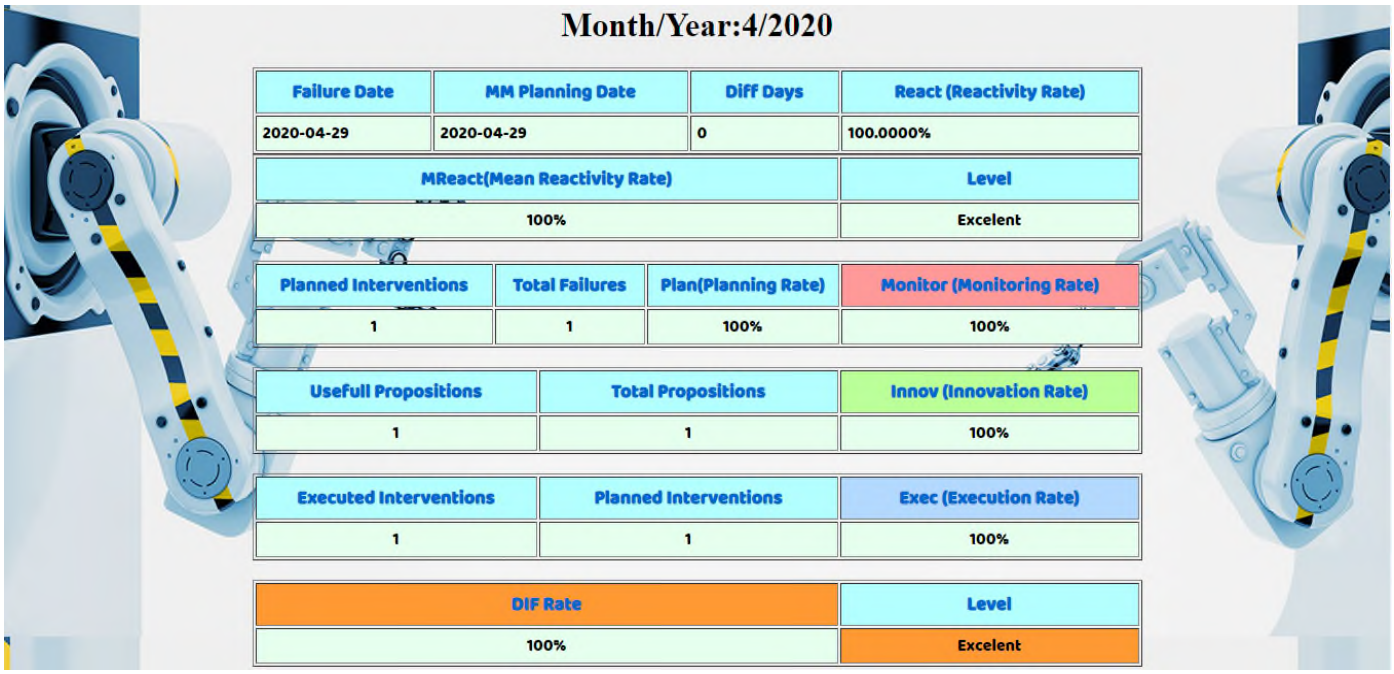


Figure 56. Menu du Responsable maintenance.

La plateforme effectue le calcul automatique et autonome des indicateurs d'interaction (indicateurs DIF) afin de permettre au responsable maintenance de suivre la performance interactionnelle du sous-système physique du système logistique maintenance à travers un tableau de bord détaillé représentant les différents indicateurs calculés en temps réel de façon mensuelle. À titre d'exemple, La figure 57 présente le tableau de bord du mois d'avril 2020.



Month/Year:4/2020

Failure Date	MM Planning Date	Diff Days	React (Reactivity Rate)
2020-04-29	2020-04-29	0	100.0000%

MReact(Mean Reactivity Rate)	Level
100%	Excelent

Planned Interventions	Total Failures	Plan(Planning Rate)	Monitor (Monitoring Rate)
1	1	100%	100%

Usefull Propositions	Total Propositions	Innov (Innovation Rate)
1	1	100%

Executed Interventions	Planned Interventions	Exec (Execution Rate)
1	1	100%

DIF Rate	Level
100%	Excelent

Figure 57. Tableau de bord des indicateurs DIF.

De retour au menu, La consultation des différentes déclarations se fait en cliquant sur le bouton "Failure Control".

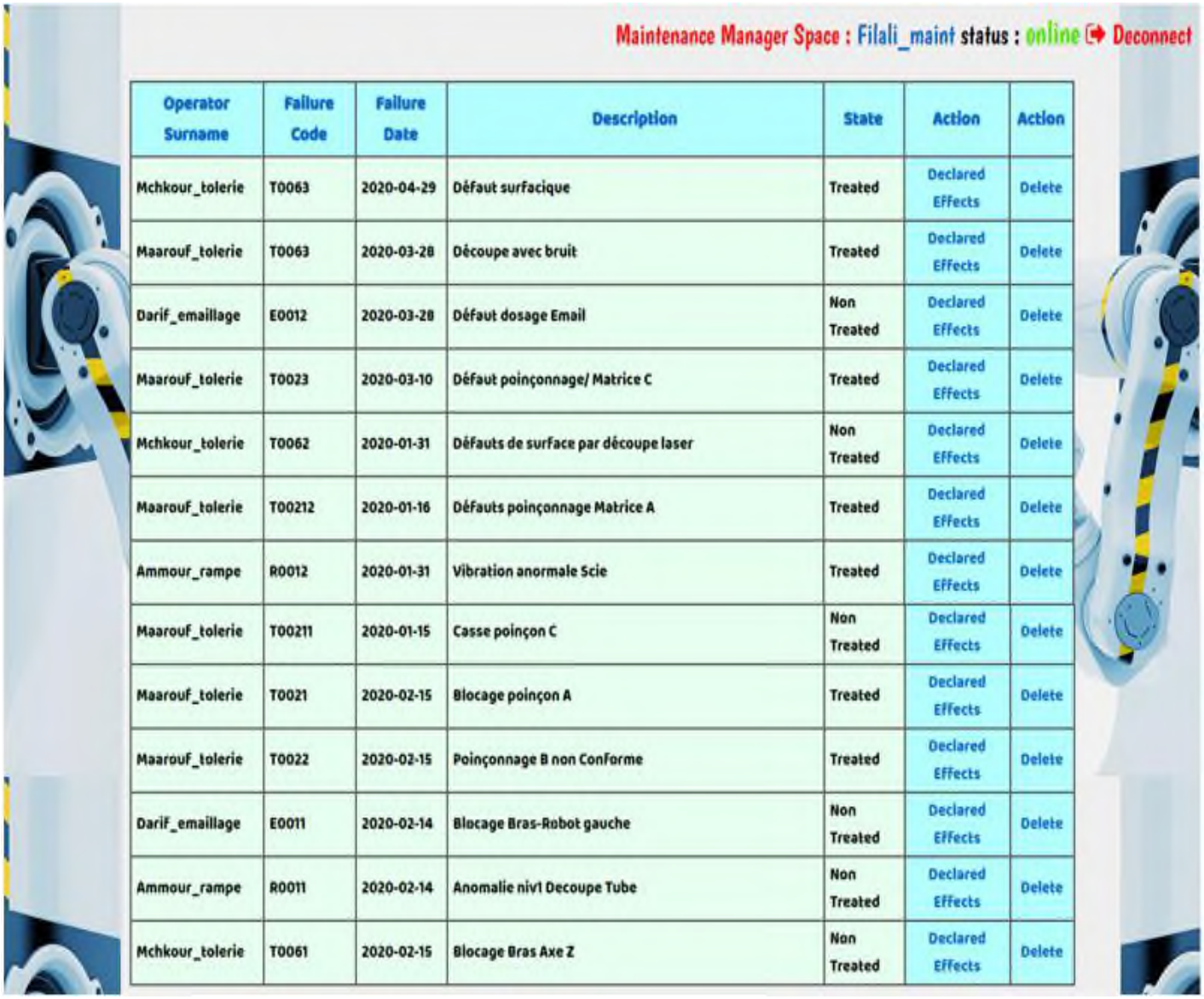


Figure 58. Interface de gestion des défaillances déclarées.

Afin de consulter les effets la défaillance E0012 déclarée par le responsable poste ayant le pseudonyme "Darif_emaillage", il suffit de cliquer sur "Declared effects" pour voir la criticité et son message reflétant l'urgence et la priorité d'intervention (figure 59). Ainsi, le responsable maintenance peut consulter tous les détails à propos d'une défaillance afin de planifier l'intervention adéquate en affectant un opérateur de maintenance qui collabore avec le responsable poste sur place pour mettre en place les actions correctives ou préventives nécessaires.

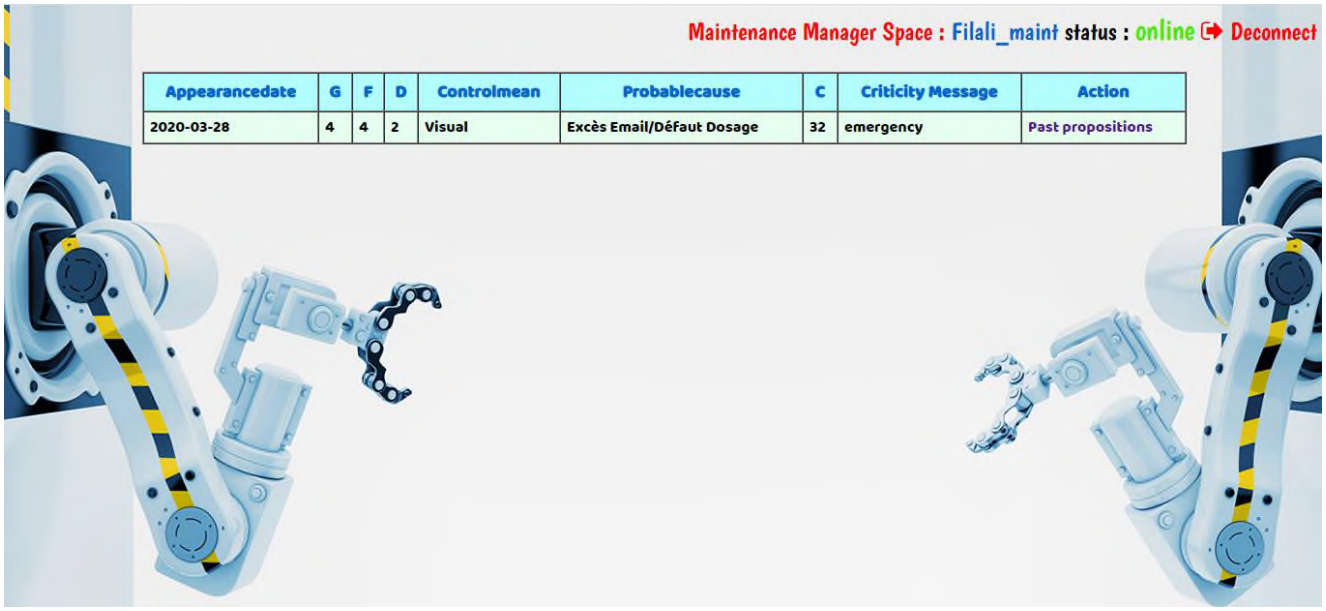


Figure 59. Interface d'évaluation des Effets.

5.5. Menu de l'opérateur de maintenance

L'opérateur de maintenance confirme la proposition du responsable poste ou propose la solution alternative dans le cas échéant comme il se charge de la confirmation du succès d'exécution de cette proposition.

Le menu de l'opérateur de maintenance est représenté par la figure 60.



Figure 60. Menu de l'opérateur de maintenance.

5.6. Menu du responsable production

La collaboration avec le service production s'avère primordiale étant l'un des objectifs principaux de la plateforme, via l'implication de l'opérateur de production (le responsable poste) et d'autre part en

collaborant avec le responsable production pour lui permettre le suivi des défaillances et des interventions en temps réel via le menu de la figure 61.

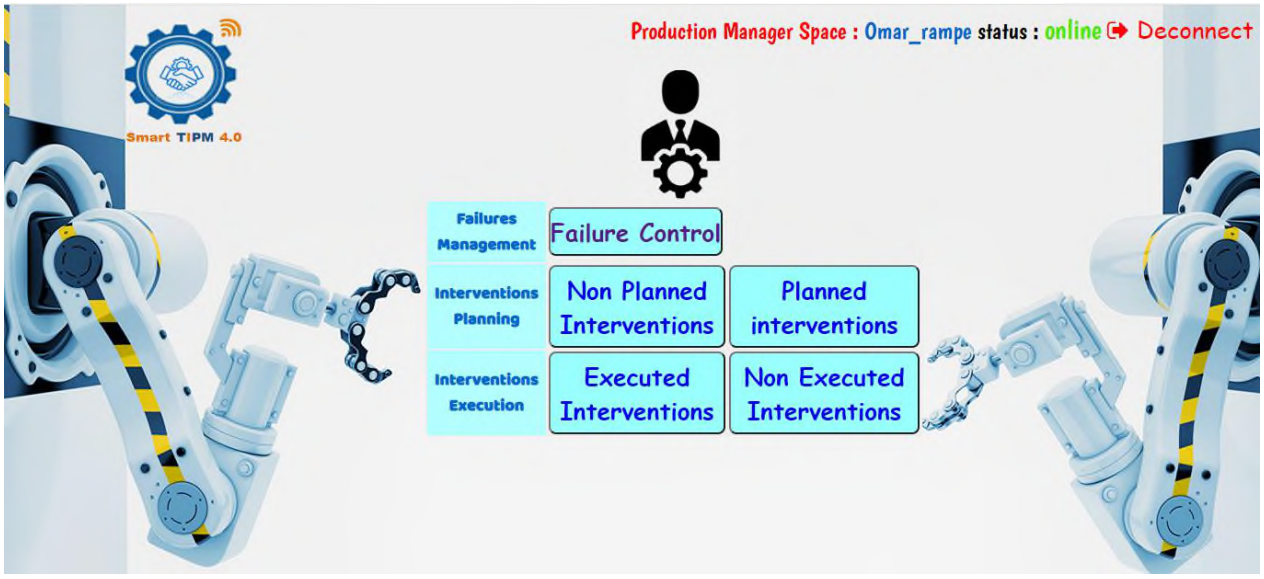


Figure 61. Menu du responsable production.

IV. Conclusion

L'industrie 4.0 étant encouragée par le défi de lutte contre la pandémie COVID 19 ainsi que par le besoin d'une collaboration plus efficace et en temps réel, offre un environnement plus flexible et prêt à mettre en place les initiatives d'une maintenance interactive dévoilant ainsi des outils pratique pour une maintenance 4.0.

La conception et le développement de la plateforme Smart TIPM 4.0 s'instaure dans le cadre de concrétisation du modèle Lean/REX proposé pour l'activation et l'exploitation du REX dynamique permettant ainsi d'implanter et renforcer la culture d'amélioration continue de manière interactive entre les sous-systèmes du système logistique maintenance.

Afin de fournir un outil complet et efficace d'aide à la décision réunissant des indicateurs interactionnels et techniques reflétant les aspects de performance technico-humaine, la plateforme cible apporter les bénéfices de la TPM et de l'intégration du retour d'expérience dans un contexte interactif entre les différents acteurs.

Conclusion générale

Le management de la logistique maintenance demeure un levier primordial pour la disponibilité de tout système de production. Le rôle de la logistique maintenance étant rarement défini par rapports à ses aspects managériaux ainsi qu'organisationnels, reste dépendant du facteur humain et son implication pour une interaction plus flexible avec l'outil de production.

Dans le cadre de cette thèse, le rôle de la logistique maintenance a été étudié dans une nouvelle vision définissant la logistique maintenance via une approche systémique considérant la logistique maintenance un système composé de trois sous-systèmes interagissant entre eux. La disponibilité et la performance du sous-système physique reflètent les pratiques liées aux stratégies managériales définies au niveau du sous-système de management stratégique de maintenance et communiqué via le sous-système d'information et de communication de la maintenance.

Les résultats de l'étude empirique effectuée portant sur un échantillon de 281 entreprises marocaines dont 152 réponses collectées dévoilent un niveau insuffisant de communication et implication de l'opérateur (particulièrement l'opérateur de production). Ainsi, les conclusions des deux études de cas confirment ces résultats et montrent l'intérêt d'un cadre plus durable pour la logistique maintenance en reconnaissant l'impact bénéfique du lean et dévoilant le besoin d'un outil d'implantation pour renforcer l'implication du facteur humain. Les systèmes de productions enquêtés et les deux systèmes de productions étudiés ont exprimé leur aptitude pour l'implantation du lean ainsi que pour l'intégration du retour d'expérience des opérateurs comme ils ont exprimé le besoin d'un outil efficace pour la communication et la mise en œuvre de ces initiatives avouant que son absence constitue l'obstacle majeur devant toute amélioration faisant preuve de la nécessité de conception d'un modèle durable de la logistique maintenance intégrant la philosophie lean et le retour d'expérience.

L'organisation de l'environnement logistique de travail étant un élément d'influence sur le rendement des opérateurs et le déroulement des interventions, comme témoigné par les résultats de l'étude empirique, requière un outil adapté et standard pour la gestion quotidienne des stocks de maintenance. Dans cette optique, nous proposons l'outil 5SMS ciblant l'efficacité et la pérennisation des améliorations de l'environnement de travail, en plus du nouvel indicateur TMR proposé pour l'évaluation des améliorations atteinte via les 5SMS. Or, ces objectifs d'amélioration et de disponibilité pérenne du système et ses ressources ne pouvant être atteints sans un opérateur bien impliqué faisant appel aux initiatives de gestion des expériences pour l'activation de son retour d'expérience. Ainsi, le modèle Lean/Rex est proposé afin

d'activer le REX dynamique en renforçant la culture de la résolution de problèmes liés aux équipements dans le cadre d'amélioration continue.

La plateforme Smart TIPM 4.0 a été développée pour répondre aux objectifs d'implantation du modèle Lean/REX impliquant tous les acteurs de façon interactive et valorisant le retour d'expérience des opérateurs. Le modèle et la plateforme proposés reflètent une initiative originale pour illustrer l'histoire de passage de la TPM classique à la TIPM qui est une nouvelle version interactive et durable de la maintenance productive totale. Les traits de cette histoire définis pour la première fois dans le cadre de cette thèse. Cette initiative révèle une mutation vers une nouvelle stratégie de maintenance (TIPM) réunissant les aspects de performance technico-humaine via des nouveaux indicateurs proposés, là encore où le développement d'un indicateur plus générique et synthétique couvrant l'ensemble de ses aspects, qu'on nomme TRSI (Taux de rendement synthétique Interactionnel) sera intégré comme alternative au TRS (Taux de rendement synthétique). Cette orientation reste l'objet de nos travaux actuels et futurs illuminés par les nouveaux indicateurs conçus pour répondre aux objectifs de cette thèse.

Un tableau de bord d'indicateurs est conçu dans le contexte de la plateforme, assurant le suivi du sous-système physique à la base des indicateurs techniques et interactionnels.

La plateforme proposée est considérée un outil de collaboration à distance en temps réel répondant aux enjeux de lutte contre la pandémie COVID-19 dans le cadre de l'industrie 4.0 concrétisant ainsi la perspective de l'usine connectée avec un système logistique maintenance connecté.

Références

[1] R. Biteau, & S. Biteau, La maîtrise des flux industriels, Éditions d'Organisation, 2003.

[2] F.W. Taylor, Scientific Management, Harpers and Brothers, 1911, traduction française : La direction scientifique des entreprises, Dunod, 1957, pp. 309-54.

[3] J. M. Plane, Management des organisations, Paris, Dunod, 2003.

[4] Y. Cohen, Organiser à l'aube du taylorisme: la pratique d'Ernest Mattern chez Peugeot, 1906-1919, Vol. 725, Presses Univ. Franche-Comté, 2001.

[5] N. E. Hilali, & J. P. Mathieu, Taylorisme, "Fordisme et Toyotisme: comment le design management a construit les principaux modèles productifs de la théorie des organisations," The proceedings of the 2010 DRS Montreal Conference, Montreal, 2010.

[6] S. González-Crespo and J. M. Vazquez, "Ford Motor Company in Cadiz 1929-1923," Procedia Manufacturing, Elsevier, vol. 13, pp. 1397–1404, 2017.

[7] B. Lyonnet, Amélioration de la performance industrielle: vers un système de production Lean adapté aux entreprises du pôle de compétitivité Arve Industries Haute-Savoie Mont-Blanc, 2010, Thèse de doctorat.

[8] A. Gramsci, Selection from the Prison Notebooks, Selections from the prison notebooks, edited and translated by Quintin Hoare and Geoffrey Nowell Smith, 1971.

[9] D. Cohen , Les Infortunes de la prospérité, Agora Pocket, Julliard, Paris, 1994, p. 113.

[10] G. Debord, La Société du spectacle, Gallimard, Folio, 1992, p. 39

[11] J. Womack, D. Jones and D. Roos, The Machine that changed the World. Rawson Associates, New York, 1990.

[12] G. Friedmann, Problèmes humains du machinisme industriel, Gallimard, Paris, 1936.

[13] B. Coriat, L'atelier et le chronomètre [The workshop and the stopwatch], Paris: Christian Bourgeois, 1979.

[14] R. Boyer, La flexibilité du travail en Europe, La découverte, Paris, 1986.

[15] T. Ohno, Toyota production system: beyond large-scale production, 1988, crc Press.

[16] JK. Liker, The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer, McGraw-Hill, 2004.

[17] R. Boyer and M. Freyssenet, Les modèles productifs. Paris: La Découverte, 2000.

[18] S. Pelayo, R. Marcilly, F. Anceaux, S. Bernonville and M. C. Beuscart-Zephir, "Human-Machine task allocation: Impact on patient safety in hospital settings", Psychologie Française, vol. 60, no 2, pp. 97-110, 2015.

[19] C. Everaere, and P. Perrier, "La flexibilité dans les organisations industrielles,Techniques de l'ingénieur," L'Entreprise industrielle, 1999, vol. 1, no AG3100, p. AG3100. 1-AG3100. 16.

[20] T. Rosqvist, K. Laakso, and M. Reunanen, "Value-driven maintenance planning for a production Plant," Reliability Engineering & System Safety, 2009, vol. 94 no. 1, pp 97–110.

[21] F. MARMIER, Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contrainte de compétence: une approche dynamique, proactive et multi-critère, 2007,Thèse de doctorat.

[22] H. Kaffel, La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en oeuvre, 2001, Thèse de doctorat, Faculté des sciences et de Génie, Université Laval, Quebec.

[23] S. K. Pinjala, L. Pintelon, and A. Vereecke, "An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies," International journal of production economics, vol. 104, no. 1, 2006, pp. 214-229.

[24] L. Pintelon, G. Waeyenbergh, A practical approach to maintenance modelling, in: J. Ashayeri, W.G. Sullivan, M.M. Ahmad (Eds.), Flexible Automation and Intelligent .Manufacturing, Begell House Inc., New York, 1999, pp.1109–1119.

[25] F. Monchy, Maintenance: Méthodes et organisations, Dunod, 2006.

[26] Association Française pour la Normalisation (AFNOR), NF EN 13306, Total Productive management, BFN Conseil.

[27] S. Furon, Contribution à la mise en œuvre du soutien logistique: éléments méthodologiques pour une conception fondée sur un modèle de produit global, 2000, Thèse de doctorat, Université de VALENCIENNES et du HAINAUT CAMBRESIS).

[28] Association Française pour la Normalisation (AFNOR), "Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité," Recueil de Normes Françaises, 3ème édition, 1988.

[29] S.B. Blanchard, D. Verma and E.L. Peterson, Maintainability, a key to effective serviceability and maintenance management, John Wiley and Sons, Inc., New York, Etats-Unis, 1995.

[30] M. Prevost et C. Waroquier, L'analyse du soutien logistique et son enregistrement, Technique & Documentation, Lavoisier, Paris, France, 1994.

[31] M.S. Daskin, "Logistics: an overview of the state of the art and perspectives on future research," Transportation Research, Vol. 19A No. 5/6, 1985, pp. 383-98.

[32] R.H. Ballou, Business Logistics Management, 3rd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992, p. 4.

[33] S. Delsaut-Furon, D. Trentesaux and C. Tahon, Soutien logistique intégré et méthodologie de conception. Journées JDA, Nancy, 1999, pp. 321-324.

[34] E.G. Plowman, Lectures on Elements of Business Logistics. Stanford, California, Stan-ford University, Graduate School of Business, 1964, pp. 176.

[35] S.M, Chankov, T. Becker, K. Windt, "Towards definition of synchronization in logistics systems," Procedia CIRP, vol. 17, , Elsevier ,2014, pp. 594-599.

[36] W. J. Kennedy, J. W. Patterson, and L. D. Fredendall, "An overview of recent literature on spare parts inventories. International Journal of production economics," vol. 76, no. 2, 2002, pp. 201-215.

[37] B. Hopwood, M. Mellor, and G. O'Brien, "Sustainable development: mapping different approaches, Sustainable development," vol. 13, no. 1, 2005, pp. 38–52.

[38] G. H. Brundtland, our common future. United Nations, Report of the World Commission on environment and development, 1987.

[39] M. Diesendorf, "Sustainability: The corporate challenge of the 21st century," Sustainability and sustainable development, vol. 2, 2000, pp. 19-37.

[40] H.-C. Lo, R.-Y. Yu, "A study of quality management strategy for reused products". Reliability Engineering & System Safety, vol. 119, 2013, pp. 172-177.

[41] S. Hammadi, B. Herrou, "Energetic Equipment Maintenance Logistics: Towards a Lean Approach," Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 13 no. 11, pp. 4188-4192, 2018.

[42] S. Hammadi, B. Herrou, "Towards a sustainable maintenance logistics," Proceedings of the 3rd International Conference on Logistics Operations Management (GOL), May 23-25, 2016, IEEE, Fez, Morocco, ISBN: 978-1- 4673-8571-8, pp. 1-4.

[43] M. Holgado, M. Macchi, L. Fumagalli, "Maintenance business model: a concept for driving performance improvement," International Journal of Strategic Engineering Asset Management, vol. 2, no. 2, pp. 159-176, 2015.

[44]D.N.P. Murthy, A. Atrens, J.A. Eccleston, "Strategic maintenance management," Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 8, no. 4, pp. 287-305, 2002.

[45] G. Waeyenbergh, L. Pintelon, "A framework for maintenance concept development," International journal of production economics, 2004, vol. 89, no 3, pp. 395-405.

[46] R. Dunn, "Advanced maintenance technologies", Plant Engineering, Vol. 40, 1987, pp. 80-2.

[47] C. Sheu and L.J. Krajewski, "A decision model for corrective maintenance management", International Journal of Production Research, Vol. 32 No. 6, 1994, pp. 1365-82.

[48] M. Macchi, I. Roda and L. Fumagalli, "On the Advancement of Maintenance Management Towards Smart Maintenance in Manufacturing," IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. Springer, Cham, vol. 513, pp. 383–390, 2017.

[49] A.K.S. Jardine and A.H.C. Tsang, Maintenance, Replacement and Reliability: Theory and Applications. CRC Press, Boca Raton, 2006.

[50] S. Hammadi , A. Boukili, B. Herrou, M. El hammoumi, "Preventive maintenance optimisation: towards a new model," Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Paris, France, July 26-27, 2018.

[51] M. Rausand, "Reliability centered maintenance," Complex system maintenance handbook. Springer, London, 2008, pp. 79-108.

[52] I.P.S. Ahuja, J.S. Khamba, "Total productive maintenance: literature review and directions," International journal of quality & reliability management, vol. 25, no. 7, pp. 709–756, 2008.

[53] K. Fraser, H.H. Hvolby, and T.L. (Bill) Tseng, "Maintenance management models: a study of the published literature to identify empirical evidence: A greater practical focus is needed," International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 32, no. 6, pp. 635–664, Jun. 2015.

[54] L. Pintelon, S. K. Pinjala, and A. Vereecke, "Evaluating the effectiveness of maintenance strategies," Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 12, no.1, pp. 7–20, 2006.

[55] R. Abbou, Contribution à la mise en œuvre d'une maintenance centralisée: Conception et Optimisation d'un Atelier de Maintenance. Thèse de doctorat, Universit´e Joseph Fourier - GRENOBLE 1, 2003.

[56] L. Swanson, "Linking maintenance strategies to performance," International journal of production economics, Elsevier, 2001, vol. 70, no 3, pp. 237-244.

[57] I. Rasovska, Contribution à une méthodologie de capitalisation des connaissances basée sur le raisonnement à partir de cas : Application au diagnostic dans une plateforme d'e-maintenance.Université de Franche-Comté, 2006.

[58] F.S. Nowlan, H.F.Heap, Reliability Centred Maintenance, United Air Lines Inc San Francisco Ca, 1978.

[59] A. Despujols, "Optimisation de la maintenance par la fiabilité (OMF)," Techniques de l'Ingénieur, MT 9 310, 2004.

[60] Rabah Achemaoui, 'Endel (groupe GDF Suez), MÉTHODES DE MAINTENANCE, Avec laMBF, l'industriel est gagnant à tous les coups, MESURES 842 ,2012.

[61] T. GATTI, Total Productive Management, Techniques de l'ingénieur, 2003.

[62] S. Arslankaya, H. Atay, "Maintenance management and lean manufacturing practices in a firm which produces dairy products," Procedia-Social and Behavioral Sciences, Elsevier, vol. 207, pp. 214-224, 2015.

[63] S. Nakajima, TPM Development Program: Implementing Total Productive Maintenance, Productivity Press, Portland, OR, 1989.

[64] S. Nakajima, Introduction to Total Productive Maintenance (TPM), Productivity Press, Cambridge, MA, 1988.

[65] N. H. Baluch, C. S. Abdullah, and S. Mohtar, "TPM and lean maintenance-A critical review," Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business (IJCRB), 2012.

[66] R.S. Jostes and M.M. Helms, "Total productive maintenance and its link to total quality management," Work Study, Vol. 43, No. 7, pp. 18-20, 1994.

[67] J. Nunnaly, Psychometric theory. New York: McGraw-Hill, 1978.

[68] S. Shingo, Study of the Toyota Production Systems, Japan Management Association, Tokyo, 1981.

[69] P. Hines, M. Holweg and N. Rich, "Learning to evolve: A review of contemporary lean thinking," International Journal of Operations & Production Management, vol. 24, no. 10, pp. 994–1011, Oct. 2004.

[70] S. Mostafa, J. Dumrak and H. Soltan, "Lean Maintenance Roadmap," Procedia Manufacturing. Elsevier, Vol. 2, pp. 434–444, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.076.

[71] J. Bicheno, The lean toolbox 2nd edition, PICSIE books, 2000.

[72] J.K. Liker, The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer, New York, 2004.

[73] J.P. Womack, D.T. Jones, Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation, second ed, Free Press, Simon & Schuster Inc, New York, 2003.

[74] M.J. Kaczmarek, "Integrating Lean and Green Paradigms in Maintenance Management," IFAC Proceedings Volumes, vol. 47, no. 3, 2014, pp. 4471-4476.

[75] R. Smith, B. Hawkins, Lean maintenance: reduce costs, improve quality, and increase market share, Elsevier Butterworth-Heinemann, MA, 2004.

[76] C. Hallam and C. Contreras, "Integrating lean and green management," Management Decision, vol. 54, no. 9, pp. 2157–2187, Oct. 2016.

[77] M. Abreu, F. Alves, C. Anabela F. and Moreira, "Lean-Green models for eco-efficient and sustainable production," Energy, vol. 137, pp. 846-853, October, 2017.

[78] C. Davies, R.M. Greenough, "Measuring the effectiveness of lean thinking activities within maintenance," Available from: http://www.plantmaintenance.com/articles/Lean_Maintenance.pdf , 2010.

[79] W.J. Hopp, and M.L. Spearman, Commissioned Paper "To Pull or Not to Pull: What Is the Question?," Manufacturing & Service Operations Management, Vol. 6, pp. 133-148, 2004.

[80] S. De Treville, J. Antonakis, "Could lean production job design be intrinsically motivating?," Contextual, configurational, and levels-ofanalysis issues. Journal of Operations Management, vol. 24, no. 2, 2006, pp. 99-123.

[81] G. Clarke, G. Mulryan, P. Liggan, "Lean Maintenance–A Risk-Based Approach," Pharmaceutical Engineering, 2010, vol. 30, pp. 1-6.

[82] S. Rothenberg, F.K. Pil and J. Maxwell, "Lean green and the quest for superior environmental performance," Production and operations management, vol. 10, no 3, 2001, pp. 228-243.

[83] M. Jasiulewicz-Kaczmarek, P. Drożyner, "The role of maintenance in reducing the negative impact of a business on the environment. In Sustainability Appraisal: Quantitative Methods and Mathematical Techniques for Environmental Performance Evaluation," Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 141-166.

[84] A.B. Pampanelli, P. Found and A. M. Bernardes, "A Lean & Green Model for a production cell. Journal of cleaner production," 2014, vol. 85, pp. 19-30.

[85] R.A. Inman and K. W. Green, "Lean and green combine to impact environmental and operational performance," International Journal of Production Research, vol. 56, no. 14, pp. 4802–4818, Jul. 2018.

[86] S. Hartini and U. Ciptomulyono, "The relationship between lean and sustainable manufacturing on performance: literature review," Procedia Manufacturing, Elsevier, 2015, vol. 4, pp. 38-45.

[87] S. Mostafa, S.H. Lee, J. Dumrak, N. Chileshe and H. Soltan, "Lean thinking for a maintenance process," Production & Manufacturing Research, vol. 3, no. 1, 2015, pp. 236-272.

[88] Jasiulewicz-Kaczmarek M, "Integrating lean and green paradigms in maintenance management," IFAC Proceedings Volumes, vol. 47, no. 3, pp. 4471-4476, 2014.

[89] S. Hammadi and B. Herrou, "Lean integration in maintenance logistics management: a new sustainable framework," Management and Production Engineering Review, vol. 11, no.2, 2020.

[90] J. Cohen, Statistical power analysis for the behavioral sciences. 1988, 2nd edn, Á/L.

[91] K.E. Bullington, "5S for Suppliers", Quality Progress, Vol. 36, No.1, 2003, pp. 56–60.

[92] M.M. Ravikumar, K. Marimuthu and D. Chandramohan, "Implementation of Lean Manufacturing in Automotive Manufacturing Plant [TEL]," International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 4, No. 10, 2009, pp. 2041–2050.

[93] M. Imai, Gemba Kaizen, 1997, McGraw-Hill, New York, N.Y.

[94] T. Osada, The 5–S: Five Keys to a Total Quality Environment, 1991, Asian Productivity Organization, Tokyo.

[95] T. Osada, 5S – Tezukuri no manajimentshuho (5S – Handmade management technique), 1989, Japan Institute of Plant Maintenance, Tokyo.

[96] Nurosis, M. Statistical Data Analysis, SPSS Inc, Chicago, IL, 1994.

[97] E. Cristobal, C. Flavian, M. Guinaliu, 2007. "Perceived e-service quality (PeSQ): measurement validation and effects on consumer satisfaction and web site loyalty," Managing Service Quality, vol. 17, no.3, pp. 317–340.

[98] S. Hammadi and B. Herrou, "Maintenance logistics management: a new Lean/REX model to activate the human potential," The 5th edition of the IEEE International Conference on Logistics Operations (GOL'20), October 28-30, 2020.

[99] R. Bergmann, "Experience management: foundations, development methodology, and internet-based applications". Vol. 2432 of Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2002.

[100] M. Grundstein, De la capitalisation des connaissances au management des connaissances dans l'entreprise. in I. Boughzala & J. L. Ermine, eds, 'Management des connaissances en entreprise', Edition Hermes Science, Paris, chapter 1, pp. 25–54, 2004.

[101] J.Y. Bück , Le management des connaissances et des compétences en pratique, 2ème édi-tion. Éditions d'Organisation, (1999), 2003.

[102] L. F. Lai.: "A knowledge engineering approach to knowledge management", Information Sciences, vol. 177, no. 19, pp. 4072–4094, 2007.

[103] [14] P-A. Potes Ruiz, Génération de connaissances à l'aide du retour d'expérience: application à la maintenance industrielle, 2014, Thèse de doctorat.

[104] M. Grundstein, "De la capitalisation des connaissances au management des connaissances dans l'entreprise, les fondamentaux du knowledge management", Int – Entreprises 3 jours pour faire le point sur le Knowledge Management, 2003.

[105] R.R. Nelson, S.G. Winter, "An Evolutionary Theory of Economic Change". Harvard University Press, Cambridge, MA, 1982.

[106] B.K. Foguem, T. Coudert, C. Béler, L. Geneste, "Knowledge formalization in experience feedback processes: An ontology-based approach". Computers in Industry, vol 59, no. 7, pp. 694-710, 2008.

[107] K.S. Apedome, S. Addouche, A. EL Mhamedi, L'intégration des aspects cognitifs au retour d'expérience statistique dans la résolution de problèmes industriels, 2011.

[108] C. Beler, Modélisation générique d'un retour d'expérience cognitif : Application à la prévention des risques, thèse de doctorat, 2008.

[109] T. Lejarraga. , C. Gonzalez, "Effects of feedback and complexity on repeated decisions from description", Organizational Behavior and Human Decision Processes, vol. 116, no. 2, pp. 286–295. Elsevier, 2011.

[110] B. Kamsu-Foguem, T. Coudert, C. Beler, L. Geneste, "Knowledge formalization in experience feedback processes: An ontology-based approach", Computers in Industry, vol. 59, no. 7, pp. 694–710, 2008.

[111] N. Armaghan, Contribution a un système de retour d'expérience basé sur le raisonnement à partir de cas conversationnel : application à la gestion des pannes de machines industrielles, thèse de doctorat, 2009.

[112] J. C. Bickford, "Sharing lessons learned in the department of energy", in 'AAAI-00 Intelligent

Lessons Learned Systems Workshop', Austin, Texas, USA, 31 juillet2000, pp. 5–8.

[113] H. Kagermann, W. Wahlster & J. Helbig, eds, Recommen-dations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013.

[114] I. Deniaud, F. Marmier and J.L. Michalak, “Méthodologie et outil de définition de la stratégie de transition 4.0 pour la chaine logistique”, No. 2019-14, Bureau d'Economie Théorique et Appliquée, UDS, Strasbourg, 2019.

[115] J. Lee, B. Bagheri and H. A Kao, “A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems”, Manufacturing letters, 3, 18-23, 2015.

[116] M. HERMANN, T. PENTEK, B. OTTO, “Design principles for industrie 4.0 scenarios”, 2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS), IEEE, 2016, pp. 3928-3937.

[117] E. Hofmann, M. Rüsch, “Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics”, Computers in Industry, Vol. 89, pp. 23-34, 2017.

[118] H. Kagermann, W. Lukas, and W. Wahlster, “Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution,” VDI nachrichten 13, 2011.

[119] K. Weifang, and P.P. Agarwal. "Chest imaging appearance of COVID-19 infection," Radiology: Cardiothoracic Imaging 2.1, e200028, 2020.

[120] World Health Organization, "Coronavirus disease 2019 (COVID-19): situation report, 72", 2020.

[121] M. Fayad, and D. C. Schmidt, “Object-oriented application frameworks”. Communications of the ACM, vol. 40, no. 10, pp. 32-38, 1997.

[122] M. R. Chaudron, W. Heijstek and A. Nugroho, “How effective is UML modeling?”, Software & Systems Modeling, vol. 11, no. 4, pp. 571-580, 2012.

[123] R. Ladhari, “Developing e-service quality scales: A literature review”, Journal of Retailing and Consumer Services”, vol. 17, No 6, pp. 464-477, 2010.

[124] M. O’Neill, C. Wright, and F. Fitz, “Quality evaluation in on-line service environments: an application of the importance–performance measurement technique”, Managing Service Quality, vol. 11, no. 6, pp. 402–417, 2001.

[125] S. J. Barnes, and R.T. Vidgen, "An integrative approach to the assessment of e-commerce quality", Journal of Electronic Commerce Research, vol. 3, no.3, 114-127, 2002.

[126] T. Poulsen, C.B. Hasager, and C.M. Jensen, “The role of logistics in practical levelized cost of energy reduction implementation and government sponsored cost reduction studies: Day and night”, offshorewind operations and maintenance logistics. Energies, vol. 10, no. 4, 2017, doi:10.3390/en10040464.

[127] C. Dietrich, N. Daneshjo, M. Danishjoo, “Failure prevention in maintenance services and logistics”. MM Science Journal, pp. 1838-1844. June, 2017, doi:10.17973/MMSJ.2017_06_201708.

[128] L. Alonso, E. M. Rubio, B. de Agustina and R. Domingo, “Latest clean manufacturing trends applied to a world class manufacturing management for improving logistics and environmental performance”. Procedia Manufacturing, Elsevier, vol. 13, pp. 1151-1158, 2017.

[129] A. S. Eruguz, T. Tan, and G.-J. van Houtum, “A survey of maintenance and service logistics management: Classification and research agenda from a maritime sector perspective,” Computers & Operations Research, vol. 85, pp. 184–205, Sep. 2017.

[130] M. Shafiee, “Maintenance logistics organization for offshore wind energy: Current progress and future perspectives,” Renewable Energy, 77, 182-193, 2015.

[131] M. Lewandowski and S. Oelker, "Towards Autonomous Control in Maintenance and Spare Part Logistics – Challenges and Opportunities for Preacting Maintenance Concepts," Procedia Technology, Elsevier, vol. 15, pp. 333–340, 2014.

[132] S. H. Kim, M. A. Cohen, and S. Netessine, "Performance contracting in after-sales service supply chains", Management science, vol. 53, no. 12, pp. 1843-1858, 2007.

[133] E. Negri, S. Perotti, L. Fumagalli, G. Marchet and M. Garetti, "Modelling internal logistics systems through ontologies," Computers in Industry, 88, 19-34, 2017.

[134] D. Sherwin, "A review of overall models for maintenance management," Journal of quality in maintenance engineering, vol. 6, no. 3, pp. 138–164, 2000.

[135] R. Singh, A. M. Gohil, D. B. Shah, and S. Desai, "Total Productive Maintenance (TPM) Implementation in a Machine Shop: A Case Study," Procedia Engineering, Elsevier, vol. 51, pp. 592–599, 2013.

[136] B. Alsubaie and Q. Yang, "Maintenance Process Improvement Model by Integrating LSS and TPM for Service Organisations," *Engineering Asset Management 2016*, M. J. Zuo, L. Ma, J. Mathew, and H.-Z. Huang, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 13–24

[137] S. Muthu, S. R. Devadasan, S. Ahmed, P. Suresh, and R. Baladhandayutham, "Benchmarking for strategic maintenance quality improvement",*Benchmarking* International Journal, vol. 7, no. 4, pp. 292–303, Oct. 2000.

[138] C. N. Madu, "Competing through maintenance strategies," International Journal of *Quality and Reliability Management*, vol. 17, no. 9, pp. 937–949, Dec,2000.

[139] S. Wan, D. Li, J. Gao, R. Roy, and Y. Tong, "Process and knowledge management in a collaborative maintenance planning system for high value machine tools," Computers in Industry, Elsevier , vol. 84, pp. 14–24, Jan. 2017.

[140] O. Candell, R. Karim, and P. Söderholm, "eMaintenance—Information logistics for maintenance support," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, vol. 25, no. 6, pp. 937–944, Dec, 2009.

[141] A. W. Veenstra, R. Zuidwijk, and B. Geerling, "Maintenance logistics in the Dutch Dredging Industry," *2006 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, Shanghai, China, 2006, pp. 436–441.

[142] M. López Campos and A. Crespo Márquez, "Review, classification and comparative analysis of maintenance management models," Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems, Vol. 3, No. 3, pp.110–115, 2009.

[143] S. Ghayebloo and K. Shahanaghi, "Determining maintenance system requirements by viewpoint of reliability and lean thinking: a MODM approach," Journal of Quality in Maintenance Engineering , vol. 16, no. 1, pp. 89–106, Mar. 2010.

[144] D. Nowicki, U. D. Kumar, H. J. Steudel and D. Verma, "Spares provisioning under performance-based logistics contract: profit-centric approach". Journal of the Operational Research Society, 59(3), pp. 342-352, 2008.

[145] H. Löfsten, "Management of industrial maintenance – economic evaluation of maintenance policies," *International* Journal of Operations & Production Management, vol. 19, no. 7, pp. 716–737, Jul. 1999.

[146] J. D. Morales Méndez and R. S. Rodriguez, "Total productive maintenance (TPM) as a tool for improving productivity: a case study of application in the bottleneck of an auto-parts machining line,"

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 92, no. 1–4, pp. 1013–1026, Sep. 2017.

[147] A. Garg and S. G. Deshmukh, "Maintenance management: literature review and directions," Journal of quality in maintenance engineering, vol. 12, no. 3, pp. 205–238, Jul. 2006.

[148] A. Chelbi and D. Ait-Kadi, "Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit submitted to regular preventive maintenance," European Journal of Operational Research, Vol. 156 No. 3, pp. 712-8, 2004.

[149] C. Chen, Y. Chen and J. Yuan, "On a dynamic preventive maintenance policy for a system under inspection," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 80 No. 1, pp. 41-7, 2003

[150] A. Naji, Z. Beidouri, M. Oumami and O. Bouksour, "Maintenance Management and Innovation in Industries: a survey of Moroccan companies," International Journal of Innovation, vol. 4, no. 2, pp. 188-197, 2016

[151] K. Fraser, "Facilities management: the strategic selection of a maintenance system," Journal of Facilities Management, vol. 12, no. 1, pp. 18–37, Jan. 2014.

[152] M. A. Hassanain, T. M. Froese and D. J. Vanier, "Development of a maintenance management model based on IAI standards," Artificial Intelligence in Engineering, 15(2), 177-193, 2001.

[153] H. T. Duong and G. Paché, "Théorie des ressources appliquée à la logistique: une identification de cinq dimensions clés," Logistique & Management, vol. 23 no. 2, pp. 55-72, 2015.

[154] C. Caplice and Y. Sheffi, "A review and evaluation of logistics performance measurement systems," The International Journal of Logistics Management, 1995, vol. 6, no.1, pp. 61-74.

[155] A. K. Gupta and R. k. Garg, "OEE improvement by TPM implementation: a case study," International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research, vol. 1, no. 1, 115-124, 2012.

[156] J. Leflar, "TPM at Hewlett-Packard," 10th Total Productive Maintenance Conference, 1999, Las Vegas, NV, Productivity, Inc.

[157] S. Hammadi and B. Herrou, "Maintenance Logistics Management: A Survey Study in the Moroccan Industrial Context," International Journal of Supply Chain Management (IJSCM), vol.9, no. 5, 2020.

[158] S. Hammadi and B. Herrou, "Lean/ Experience feedback for sustainable logistics management: a new approach based on survey study evidence in Morocco," International Journal of Logistics Systems and Management, Special Issue: GOL'18 Sustainable Logistics Strategies, Inderscience publisher, 2021, In press.

[159] K. A. Adamson, S. Prion, "Reliability: Measuring Internal Consistency Using Cronbach's α", Clinical Simulation in Nursing,Vol 9, no 5, 2013, pp. e179-e180.

[160] S. MOUSSA, "L'alpha de Cronbach et l'estimation de son intervalle de confiance: L'étude de deux approches". Colloque international Entrepreneuriat et Entreprise dans la Nouvelle Economie : Contextes, Financement, Stratégie, Gouvernance et Performance,Les 7, 8 et 9 Mars 2008, Jugurtha palace, Gafsa, Tunisie.

Productions Scientifiques

Publications dans des journaux internationaux

- S. Hammadi, B. Herrou, Lean integration in maintenance logistics management: a new sustainable framework, Management and Production Engineering Review, Vol 11, N 2, June 2020, pp. 99–106. **Scopus and WOS (ISI Thomson reuters) Indexed.**
- S. Hammadi, B. Herrou, Maintenance logistics management: A survey study in the Moroccan industrial context, International Journal of Supply Chain Management, Vol. 9, No. 5, October 2020.
- S. Hammadi, B. Herrou, "Energetic Equipment Maintenance Logistics: Towards a Lean Approach," Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 13 no. 11, pp. 4188-4192, 2018. **Scopus Indexed**.
- S. Hammadi, B. Herrou, Lean/Experience feedback for sustainable logistics management within industry 4.0 perspective: a new approach based on survey study evidence in Morocco, Int. J. Logistics Systems and Management, Inderscience publishers, in press, **Scopus Indexed.**
- Hammadi Salima, and Brahim Herrou. "Sustainable control of industrial production systems: A hybrid model lean/project management." International Research Journal of Engineering and Technology **ISO 9001-2008 Certified,** vol 3, N 11, Nov 2016.

Communications dans des conférences et congrès nationaux et internationaux

- S. Hammadi, B. Herrou, "Maintenance logistics management: a new Lean/REX model to activate the human potential", the fifth edition of the **IEEE** International Conference on Logistics Operations Management, October, 28 – 30, ENSIAS, Rabat, Morocco. **Scopus Indexed.**
- S. Hammadi, B. Herrou, "Experience feedback integration in maintenance logistics management: A new sustainable approach", CPI 2019 (11th International Conference on Integrated Design and Production 14 - 16 octobre 2019 Fès.
- Salima Hammadi, Amal Boukili, Brahim Herrou and Mohammed El Hammoumi, "Preventive maintenance optimisation: towards a new model." 2nd IEOM European Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 26 et 27 juillet 2018, IESEG Paris Campus Paris, France, **Scopus Indexed.**
- Hammadi, Salima and Brahim Herrou, "Towards a sustainable management model to solve maintenance logistics problems", 11éme édition du colloque international de la logistique et le supply chain management (LOGISTIQUA 2018), 26-27 Avril FST, Tanger, Maroc.
- Hammadi, Salima, and Brahim Herrou. "Lean maintenance logistics management: the key to green and sustainable performance", 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL). IEEE, 2018, 10-12 April, le Havre, France, **Scopus Indexed.**

- Salima Hammadi and Brahim Herrou, "Human-machine conflict management : towards a sustainable approach of maintenance logistics", Congrès International de Modélisation et Optimisation des Systèmes Mécaniques, 5et 6 Décembre 2017, FST, Fès, Maroc.
- Salima Hammadi and Brahim Herrou, "Le Lean en maintenance des équipements énergétiques : vers une méthode d'implantation", 3ème Rencontre Nationale des Jeunes Chercheurs en Sciences de I 'Ingénieur (RNJC'17), 29 et 30 Novembre 2017 à la FST, Fès.
- Salima Hammadi and Brahim Herrou, "Le lean management en maintenance : vers une méthode interactive d'implantation", 3ème édition du Congrès International du Génie Industriel et du Management des Systèmes, 17 - 18mai 2017, ENSAM-Meknès, Maroc.
- Salima Hammadi et al, "Vers une lean logistique de maintenance pour les équipements énergétiques", 2ème édition du Colloque Franco-Marocain sur les Energies Renouvelables et leur integration aux réseaux électrique (COFMER'02**)**, du 11 au 13 avril 2017, FST, Fès, Maroc.
- Salima Hammadi and Brahim Herrou, "Towards Lean maintenance project management", 3ème Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels, CIMSI'2016, 19-20 Octobre 2016 FST, Fès, Maroc.
- Salima Hammadi and Brahim Herrou, "Towards sustainable maintenance logistics", 3ème édition de la conférence **IEEE** Internationale Gestion Opérationnelle de la logistique, 23, 24 et 25 Mai 2016 FST, Fès, Maroc, **Scopus Indexed.**
- Salima Hammadi and Brahim Herrou, "Etude de rôle de la logistique maintenance dans un système de production", Les doctoriales 2016, 18, 19 et 20 Mai 2016 FST, Fès, Maroc.
- Salima Hammadi and Brahim Herrou, "Vers un système de production interactif", Workshop Les Systèmes de Production Industriels : Pilotage, Automatisation et Maintenance Industrielle, 12 Mai 2016.

Annexes

Annexe 1. Questionnaires

Etat des lieux des stratégies et pratiques managériales de la maintenance au sein des systèmes de production

Ce formulaire a pour objectif d'identifier les problèmes liés aux stratégies pratiques managériales de maintenance au sein des systèmes de production pour des raisons de recherche dans le cadre de préparation d'une thèse de doctorat.

Information générale sur le système de production

Cette partie a pour but d'introduire votre système de production

1. **Notez le nom de votre société :** *

2. **Quelle est la taille de votre entreprise ?**
   Une seule réponse possible.
   - ◯ Petites entreprise
   - ◯ Moyenne entreprise
   - ◯ Grande entreprise

3. **Saisissez le nombre du personnel de la société**

4. **Saisissez la raison sociale de votre organisme**

5. Quel est votre produit/service ?

Niveau de communication interne et implication des opérateurs

Cette partie est consacrée à l'évaluation du niveau de communication entre le service maintenance et les autres services de la société ainsi que du niveau d'implication des opérateurs dans la résolution des problèmes liés aux équipements.

6. **Comment évaluez-vous le niveau de communication entre le département/service maintenance et les autres services ?**

Une seule réponse possible.

- ◯ Très satisfaisant
- ◯ Satisfaisant
- ◯ Plus ou moins satisfaisant
- ◯ Peu satisfaisant
- ◯ Pas du tout satisfaisant

7. **À quelle fréquence l'opérateur de production déclare l'occurrence des défaillances au bon moment ?**

Une seule réponse possible.

- ◯ Systématiquement/ toujours
- ◯ Souvent
- ◯ Quelquefois
- ◯ Rarement
- ◯ Jamais

8. **À quelle fréquence l'opérateur de production propose des solutions aux problèmes liés aux équipements ?**

Une seule réponse possible.

- ◯ Systématiquement/ toujours
- ◯ Souvent
- ◯ Quelquefois
- ◯ Rarement
- ◯ Jamais

9. **À quelle fréquence l'opérateur de production participe à la mise en place des améliorations et plans de maintenance pour la résolution de problèmes liés aux équipements ?**

   Une seule réponse possible.

- ◯ Systématiquement/ toujours
- ◯ Souvent
- ◯ Quelquefois
- ◯ Rarement
- ◯ Jamais

Organisation de l'environnement logistique de travail

Ces questions ont pour objectif d'évaluer le niveau d'organisation de l'outillage et stocks de maintenance en général étant considérés un environnement logistique nécessaire pour le déroulement des activités de maintenance.

10. **A quel degré l'outillage, outils et moyens de la maintenance sont organisés ?**

    Une seule réponse possible.

- ◯ Très bien organisés
- ◯ Bien organisés
- ◯ Plus ou moins organisés
- ◯ Peu organisés
- ◯ Très peu organisés

11. **Si l'outillage ou le stock de maintenance en général est désorganisé, à quel degré influe-t-il sur le temps de recherche d'un outil et sur la flexibilité de déroulement des interventions ?**

    Une seule réponse possible.

- ◯ Très influent
- ◯ Influent
- ◯ Moyennement influent
- ◯ Peu influent
- ◯ Presque n'a pas d'influence

Implantation du lean en logistique maintenance

*La logistique maintenance est l'ensemble des moyens matériels et immatériels nécessaire à l'exécution de la maintenance.

12. **Avez-vous implanté ou commencé l'implantation du lean en processus de production de votre organisme ?**

    Une seule réponse possible.

- ◯ Oui
- ◯ Non

13. **A quel niveau jugez-vous bénéfique l'implantation du lean en logistique maintenance ?**
Une seule réponse possible par ligne.

	Pas du tout bénéfique	Peu bénéfique	Plus ou moins bénéfique	Bénéfique	Très bénéfique
Disponibilité des équipements	◯	◯	◯	◯	◯
Environnement logistique de travail	◯	◯	◯	◯	◯
Culture du facteur humain	◯	◯	◯	◯	◯
Coût de maintenance	◯	◯	◯	◯	◯
Temps de maintenance	◯	◯	◯	◯	◯

Positionnement du retour d'expérience par rapport au système d'information et de communication de la maintenance au sein de votre société

14. **Collectez-vous le feedback des opérateurs de production pour résoudre les problèmes de maintenance ?**
Une seule réponse possible.

- ◯ Toujours/ systématiquement
- ◯ Souvent Quelques
- ◯ fois Rarement
- ◯ Jamais
- ◯

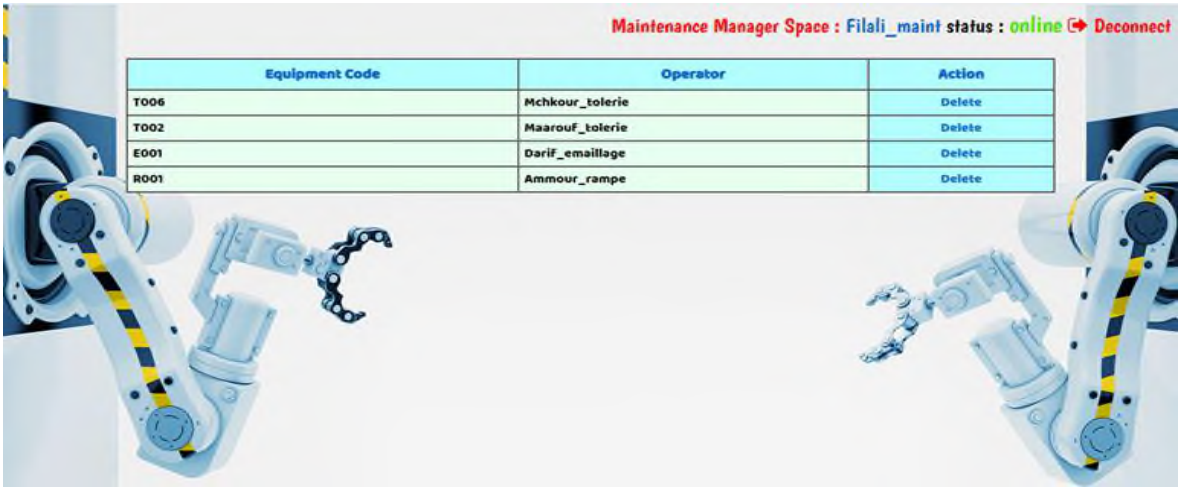
15. **A quel point jugez-vous importante l'intégration du retour d'expérience des opérateurs de production dans la résolution des problèmes liés aux équipements ?**
Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5	
Sans importance	◯	◯	◯	◯	◯	Très importante

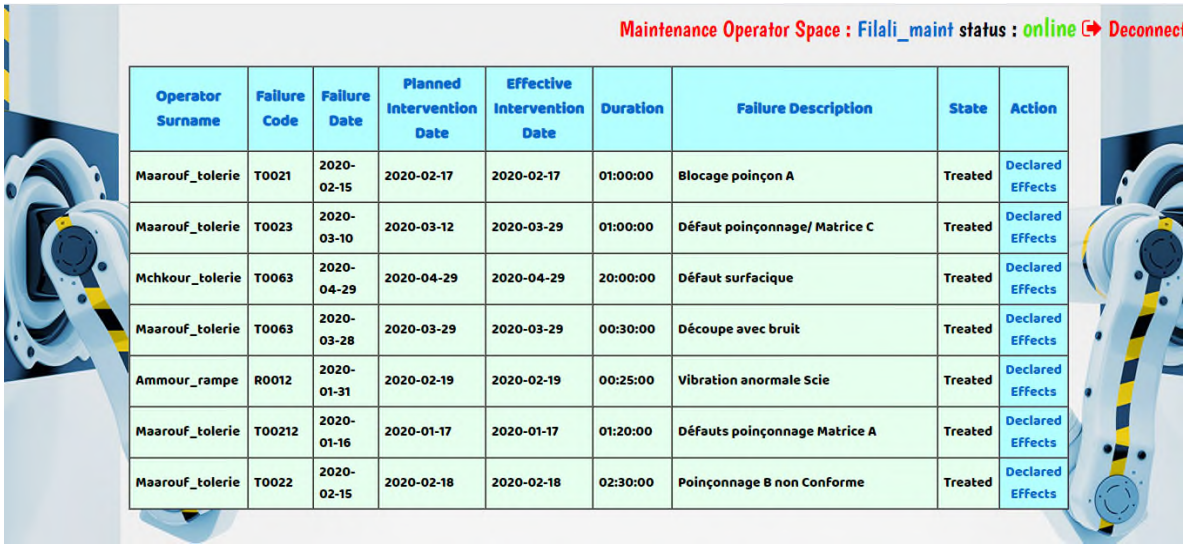
16. **Encouragez-vous l'implantation d'une plateforme de communication et de coordination à distance avec l'opérateur de production dans le but d'améliorer la disponibilité des équipements ?**
Une seule réponse possible.

- ◯ Oui
- ◯ Non

Annexe 2. Gestion des affectations des “responsables poste”.

Interface des affectations	
Requête des affectations	$query="select assignoperatorequipment.id ,equipment.code,assignoperatorequipment.idequipment,operator.surname as c, assignoperatorequipment.idoperator,assignoperatorequipment.dateassign, assignoperatorequipment.dateassigneffective from assignoperatorequipment,operator ,equipment where assignoperatorequipment.idoperator=operator.id and equipment.id=assignoperatorequipment.idequipment and type='EM'"; $rs=$db->query($query);

Annexe 3. Consultation des interventions exécutées.

Interface des interventions exécutées	
Requête des interventions exécutées	$query="select failures.id_operator,failures.id,failures.code,failures.date_failure,intervention.dateprevintervention,intervention.dateeffectiveintervention , intervention.duration,failures.description,failures.state, operator.surname from failures,operator ,intervention where id_operator=operator.id AND failures.id=intervention.idfailures and state='Treated'"; $rs=$db->query($query);

Annexe 4. Alpha de Cronbach

L'alpha de Cronbach est un coefficient et une technique statistique communément utilisée pour évaluer la consistance interne des éléments d'une échelle construite [159]. Alpha de Cronbach reste actuellement le coefficient utilisé pour juger la fiabilité d'une échelle dans la plupart des domaines. La plupart des échelles présentant une bonne fiabilité reflétée par le coefficient alpha de Cronbach, avec des valeurs supérieures à 0,70 comme confirmé par les références citées dans l'étude empirique [67][123][124][125]. Deux formules principales sont discutées en littérature en se basant sur les variances (ou sur les covariances) entre les éléments ou encore sur le calcul des corrélations [160].

$$\alpha = \left(\frac{k}{k-1}\right)\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{k}\sigma_i^2}{\sigma_T^2}\right) \quad \text{ou} \quad \alpha = \frac{k\bar{r}}{1+\bar{r}(k-1)}$$

Avec

k = nombre d'éléments.
$\sigma^2{}_i$ = variance du $i^{ème}$ *élément* avec i=1,2,…k
$\sigma^2{}_T$= variance de toute l'échelle.
$\bar{r}$ = moyenne de la corrélation entre les éléments.

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

Titre de la thèse : Contribution au management de la logistique maintenance : modèles et outils d'implantation.

Nom du candidat : **Salima HAMMADI**

Spécialité : Génie Industriel.

Résumé de la thèse

La maintenance industrielle est une discipline de large étendue faisant appel à un cadre plus générique permettant de gérer toutes les ressources. Dans cette optique, nous traitons la problématique du management de la logistique maintenance dans un cadre durable pour une interaction plus flexible entre l'opérateur et son outil de production permettant de résoudre efficacement les problèmes liés aux équipements tout en activant le potentiel du facteur humain.

Le cadre de la logistique maintenance a été étudié par rapport aux aspects organisationnels à travers l'analyse des différentes références de la revue de littérature identifiant ainsi le besoin d'une nouvelle définition considérons le système logistique maintenance un nouveau cadre organisationnel générique et durable au sein duquel les pratiques managériales sont implantées ciblant l'amélioration de la disponibilité du sous-système physique. Après avoir discuté les aspects managériaux résumant les différents modèles de management de la maintenance identifiés dans la littérature, on a mené une étude empirique basée sur l'analyse des résultats des questionnaires adressés aux systèmes de productions marocains afin d'identifier les problèmes liés au cadre managérial de la logistique maintenance. Cette analyse statistique réalisée sur le logiciel SPSS (Statistical Package for Social Sciences) a dévoilé un niveau insuffisant d'implication de l'opérateur et un environnement logistique requérant une meilleure organisation, ce qui a été confirmé par les résultats de deux études de cas réalisées au sein de deux systèmes de production marocain et canadien exprimant le besoin d'un nouveau modèle de la logistique maintenance remédiant à ces problèmes.

Dans l'objectif de répondre à ce besoin, nous proposons un nouveau modèle générique et durable de la logistique maintenance intégrant la culture lean et le retour d'expérience pour une meilleure organisation de l'environnement logistique et surtout pour une implication efficace du facteur humain via le modèle Lean/REX. La concrétisation de cette vision nécessite des outils pratiques et adaptés afin de garantir une implantation réussie des modèles proposés au milieu industriel. Ainsi, nous proposons le déploiement de l'outil 5SMS et la plateforme Smart TIPM 4.0 étant une plateforme de collaboration à distance dans le contexte du Covid-19 et de la perspective de l'industrie 4.0, comme nous proposons un ensemble de nouveaux indicateurs pour l'évaluation des améliorations atteintes dans le cadre du système logistique maintenance.

Mots clés : Logistique maintenance, modèle durable, modèle Lean/Rex, facteur humain, retour d'expérience, modélisation, développement, lutte contre le Covid-19, plateforme de collaboration à distance, indicateurs TIPM, industrie 4.0.