

Développement d'une trousse d'intervention pour une prise
en charge de la maintenance en milieu de faible maturité

par

Rodrigue MONNOU

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE CONCENTRATION TECHNOLOGIES DE LA SANTÉ

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 18 JUIN 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

© Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Michel Rioux, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Rachid Aissaoui, codirecteur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Mickaël Gardoni, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Amin Chaabane, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 10 JUIN 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Avant tout, je voudrais exprimer ma profonde gratitude à mes parents pour leurs soutiens sans fin, en particulier durant mon projet d'étude à l'École de technologie supérieure de Montréal (ÉTS).

Mes remerciements particuliers à mon directeur de mémoire, le professeur Michel Rioux, pour ses précieux conseils et son savoir dont j'ai bénéficié tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Ce projet est l'un des résultats de la vision avant-gardiste de mon codirecteur de recherche, le professeur Rachid Aissaoui. Je lui suis reconnaissant pour m'avoir donné sa confiance et un cadre pratique pour la mise en œuvre de mon travail.

Enfin, de tout mon cœur, je voudrais remercier tout le personnel ainsi que les étudiants du laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie de l'école de technologie supérieure de Montréal pour leurs accueils, amitiés et supports pendant mon séjour dans les locaux du LIO.

Rodrigue Marrel Monnou

Développement d'une trousse d'intervention pour la gestion de la maintenance en milieu de faible maturité

Rodrigue MONNOU

RÉSUMÉ

Contexte : L'évolution rapide de l'environnement concurrentiel et le manque de ressources nécessaires aux activités de maintenance obligent les entreprises à adapter leurs stratégies de gestion d'actifs aux besoins réels. La mise en place d'un programme de maintenance efficace et efficient est un moyen d'atteindre cette compétitivité souhaitée. Cependant, la mise en œuvre d'un tel programme de maintenance n'est souvent pas simple en raison de l'absence d'approche structurée d'aide à la décision. Les modèles de maturité des capacités présentent une telle approche structurée et se révèlent très utiles pour mesurer les différents aspects des pratiques en vigueur dans une organisation.

Objectifs : Le document propose un outil d'aide à la décision pour soutenir les entreprises dans leurs activités de maintenance et améliorer leurs maturités.

Méthodologie : La méthodologie en trois étapes adoptée dans cette approche soutient que les entreprises pourraient atteindre des niveaux élevés de maturité en concentrant leurs ressources sur les matériels critiques. Son adoption offre une vision claire des enjeux internes et externes inhérents aux entreprises, mais aussi une connaissance du matériel critique afin de porter des actions dont le bénéfice est garanti. La démarche permet également d'analyser le niveau de maturité atteint par les entreprises et fournit une structure d'actions évolutives.

Résultats : Il ressort de ce travail, une trousse d'intervention composée de trois principaux modules développés en mode agile sur le logiciel tableur Excel de la suite Microsoft Office. L'outil a été déployé pour application dans le Laboratoire de recherche en Imagerie et Orthopédie (LIO) à l'École de technologie supérieure de Montréal. L'analyse pré et post application démontre une meilleure compréhension de l'importance des actifs et une vision structurée des processus de maintenance à appliquer.

Originalité : Ce document présente une méthode d'alignement des besoins réels d'une organisation pour la satisfaction des segments de clientèle à son portefeuille d'actifs. Il est possible d'y observer les différentes connexions depuis la clientèle de l'organisation à son parc d'équipements. Le document devrait être utile à la fois aux chercheurs et aux professionnels de la maintenance intéressés par l'utilisation de nouvelles méthodes de gestion de la maintenance intégrant certaines exigences de la norme ISO 55000 sur la gestion d'actifs.

Mots clés : gestion de la maintenance, maturité de la maintenance, meilleures pratiques en maintenance, criticité des équipements, modèle d'affaires, gestion d'actifs physiques.

Development of an Intervention Kit for the Management of Maintenance in Low Maturity Environments

Rodrigue MONNOU

ABSTRACT

Background: The rapidly changing competitive environment and the lack of resources required for maintenance activities are forcing companies to adapt their asset management strategies to real needs. Establishing an effective and efficient maintenance program is one way to achieve this desired competitiveness. However, implementing such a maintenance program is often not straightforward due to the lack of a structured approach to decision support. Capability Maturity models have such a structured approach and are very useful for measuring different aspects of an organization's practices.

Objectives: The document proposes a maintenance management tool to support companies in their activities and improve their maturity.

Methodology: The three-step methodology adopted in this approach assumes that companies could achieve high levels of maturity by concentrating their resources on critical materials. Its adoption offers a clear vision of the internal and external issues in companies, as well as an understanding of critical materials in order to carry out actions whose profit is guaranteed. The approach also makes it possible to analyze the level of maturity reached by the companies and provides a structure of progressive actions.

Results: From this work, an intervention kit consisting of three main modules developed in agile mode on the Excel software of the Microsoft suite. The tool was deployed for application in the Imaging and Orthopaedics research Laboratory (LIO) at the École de technologie supérieure of Montréal. The pre and post intervention analysis demonstrates a better understanding of the importance of assets and a structured view of the evolutionary actions.

Originality: The document presents a method of aligning the actual needs of an organization for the satisfaction of its customer segments to its portfolio of assets. It is possible to observe the different connections from the organization's customers to its equipment park. The document should be useful to both researchers and maintenance professionals interested in using new maintenance management methods that incorporate certain requirements of the ISO 55000 asset management standard.

Keywords: maintenance management, maturity of maintenance, best practices in maintenance, criticality of equipment, business model, physical asset management.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART DES STRATÉGIES DE GESTION DE LA MAINTENANCE	5
1.1 Généralités sur la maintenance	5
1.1.1 Définition de la maintenance	5
1.1.2 Objectifs de la maintenance	5
1.1.3 Types de maintenance.....	6
1.1.3.1 Maintenance corrective.....	6
1.1.3.2 Maintenance préventive	7
1.1.3.3 Maintenance améliorative.....	7
1.1.3.4 Autres types de maintenance	8
1.1.4 Opérations de maintenance	8
1.1.4.1 Opération de maintenance corrective.....	8
1.1.4.2 Opérations de maintenance préventive	9
1.1.4.3 Opérations de maintenance améliorative	9
1.1.5 Outils de maintenance.....	9
1.1.5.1 Outils d'analyse de défaillance	9
1.1.5.2 Outils de contrôle et de surveillance.....	11
1.2 Gestion et planification de la maintenance	11
1.2.1 Gestion de la maintenance	11
1.2.2 Planification de la maintenance	13
1.2.3 Politique de maintenance	14
1.2.4 Efficacité de la maintenance	15
1.2.5 Externalisation de la maintenance	16
1.3 Ordonnancement de la maintenance	17
1.3.1 Dégradation des systèmes et des composants.....	17
1.3.2 Inspection et intervalle de maintenance.....	17
1.3.3 Gestion du cycle de vie	18
1.3.4 Coûts de la maintenance	19
1.4 Surveillance et analyse des équipements	20
1.4.1 Analyse et suivi des processus.....	20
1.4.2 Pronostic et santé des équipements.....	20
1.4.3 Analyse de fiabilité	21
1.5 Maturité de la maintenance.....	22
1.6 Insuccès de la maintenance	23
1.7 Objectifs de recherche.....	24
CHAPITRE 2 CONCEPTION DE LA TROUSSE D'INTERVENTION POUR LA GESTION DE LA MAINTENANCE	25
2.1 Méthodologie	25

2.2	Matrice d'affaires.....	27
2.2.1	Architecture générale	27
2.2.2	Segments de clientèle.....	29
2.2.3	Proposition de valeur	30
2.2.4	Activités clés.....	30
2.2.5	Ressources clés	31
2.2.6	Alignment des équipements aux besoins de l'organisation	32
2.3	Modélisation de la criticité des équipements	32
2.3.1	Domaine de criticité.....	33
2.3.1.1	Criticité point de vue Taux de Rendement Globale (TRG)	33
2.3.1.2	Criticité point de vue qualité.....	34
2.3.1.3	Criticité point de vue coûts	35
2.3.1.4	Criticité point de vue santé et sécurité	35
2.3.1.5	Criticité point de vue impact environnemental	36
2.3.2	Niveaux de criticité.....	36
2.3.3	Analyse et résultats	37
2.3.3.1	Collecte des données.....	37
2.3.3.2	Calcul de la criticité	37
2.3.3.3	Résultats.....	37
2.4	Évaluation de la maturité en maintenance	37
2.4.1	Pyramide d'excellence de la maintenance	38
2.4.1.1	Gestion de base	38
2.4.1.2	Gestion des pièces et du matériel.....	39
2.4.1.3	Gestion de la performance	39
2.4.1.4	Système IT et OT	40
2.4.1.5	Fiabilité des équipements.....	40
2.4.1.6	Gestion des équipes.....	41
2.4.2	Niveau de maturité.....	41
2.4.3	Questionnaire	42
2.4.4	Analyse et résultats	43
2.4.4.1	Collecte des données.....	43
2.4.4.2	Calcul de la maturité	43
2.4.4.3	Résultats.....	43
2.4.5	Amélioration de la maturité	43
CHAPITRE 3	APPLICATION DE LA TROUSSE D'INTERVENTION POUR LA GESTION DE LA MAINTENANCE	45
3.1	Développement de la trousse d'intervention.....	45
3.1.1	Environnement d'utilisation.....	45
3.1.2	Modules de la trousse d'intervention.....	46
3.1.2.1	Présentation des modules.....	46
3.1.2.2	Automatisation des modules	49
3.1.2.3	Résultats des modules	50
3.2	Vérification de fonctionnement	51
3.3	Application de la trousse d'intervention au LIO.....	52

3.3.1	État des lieux au Laboratoire de recherche en Imagerie et Orthopédie	52
3.3.2	Portefeuille d'actifs du LIO	53
3.3.3	Matériels critiques du LIO	54
3.3.4	Maturité de maintenance du LIO	55
3.3.5	Amélioration des pratiques de maintenance du LIO.....	55
CHAPITRE 4	DISCUSSION	57
4.1	Modèle d'affaires	57
4.2	Modèle de criticité	58
4.3	Modèle de maturité	58
4.4	Étude de cas du LIO.....	60
CONCLUSION.....		61
RECOMMANDATIONS		63
ANNEXE I	STRUCTURE D'UN SYSTÈME DE GESTION D'ACTIFS PHYSIQUES À TRAVERS ISO 55000	65
ANNEXE II	MODÈLE D'AFFAIRES.....	71
ANNEXE III	CARTE DE POINTAGE POUR L'ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ	75
ANNEXE IV	QUESTIONNAIRE D'ÉVALUATION DE LA MATURITÉ	81
ANNEXE V	RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DE LA MATURITÉ DU TAPIS ROULANT INSTRUMENTÉ AMTI DU LIO.....	87
BIBLIOGRAPHIE.....		89

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Résultats d'une évaluation de la maturité
Tableau 3.2	Résultats de l'évaluation du matériel clé du LIO.....
Tableau 3.3	Résultats de l'examen de la maturité des processus de maintenance
Tableau 3.4	Actions amélioratives des pratiques de maintenance au LIO

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Diagramme de causes-effet.....
Figure 2.1	Approche en trois étapes de gestion de la maintenance.....
Figure 2.2	Matrice d'affaire en neuf blocs
Figure 3.1	Environnement d'utilisation de la trousse d'intervention
Figure 3.2	Matrice d'affaire de la trousse d'intervention.....
Figure 3.3	Grille d'évaluation de la criticité
Figure 3.4	Grille de maturité de la maintenance
Figure 3.5	Sortie de résultats d'une évaluation de la criticité

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AHP	Analytic Hierarchy Process
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
AMTI	Advanced Mechanical Technology Inc.
CBM	Condition Based Maintenance
CMMI	Capability Maturity Model Integration
CMM	Capability Maturity Model
ÉTS	École de Technologie Supérieure
GMAO	Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization
IT	Information Technology
LIO	Laboratoire de recherche en Imagerie et Orthopédie
MP	Maintenance Préventive
N	Nombre
OQLF	Office Québécois de la Langue Française
OT	Operation Technology
PIEU	Panne Importance État et Utilisation
PSGA	Plan Stratégique de Gestion d'Actifs
QR	Question de Recherche
RCM	Reliability Centered Maintenance
TIC	Technologies de l'Information et de la Communication
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
TPM	Total Productive Maintenance
TRG	Taux de Rendement Global
VBA	Visual Basic for Applications

INTRODUCTION

Les entreprises sont confrontées à de nombreux défis tels que l'optimisation de l'exploitation et de la maintenance en raison de l'évolution continue des technologies, la compétitivité mondiale, les exigences environnementales et de sécurité. Le souci de la qualité totale et la rentabilité sont également des facteurs cruciaux pour les entreprises.

En général, la maintenance d'un parc machine consiste à garder tout type d'équipement ou de composant dans un bon état de fonctionnement, prévenir leurs défaillances, assurer leurs sécurités et garantir la qualité ainsi que la protection de l'environnement (Henrique et Sarforsky, 1999).

Il est évident que la fonction maintenance ait acquis une grande reconnaissance au cours des dernières décennies dans divers secteurs. Par conséquent, de nombreuses stratégies ont été développées pour soutenir la mise en œuvre de la maintenance (Swanson, 2003). Grâce à l'automatisation et la mécanisation croissante, les processus de production dans l'industrie deviennent très sensibles aux équipements et aux personnes. En outre, le rôle de la maintenance des équipements de contrôle de la qualité est plus évident et important que jamais (Jay et al., 2006).

L'investissement pour améliorer un système de gestion de la maintenance est souvent un défi et la décision d'investir n'est pas simple, même si les bénéfices et la productivité de l'entreprise pourraient être améliorés (Pinjala et al., 2006). Lorsque des systèmes de mesure de la maintenance appropriés sont introduits dans les entreprises, les décisions sont souvent limitées dans leur portée. Ceci en raison de la vision à court et à moyen terme des décideurs sur les performances économiques et techniques. Néanmoins, la prise de décision à long terme est un choix gagnant afin d'améliorer efficacement le système de gestion de la maintenance et le concept de maturité représente un moyen tangible pour évaluer les pratiques de maintenance afin de soutenir les décisions stratégiques (Macchi et Fumagalli, 2013).

La maturité d'une organisation est le degré auquel celle-ci a déployé explicitement et de façon cohérente les processus qui y sont documentés, gérés, mesurés, contrôlés et continuellement

améliorés (CMMI, 2001). Un processus est un levier pour l'amélioration continue de l'organisation et la mesure de la maturité des processus a pour objectif d'aider les entreprises à gérer le développement, l'acquisition et la maintenance de produits ou de services. L'intégration d'un modèle de maturité place des approches éprouvées dans une structure qui permet aux entreprises d'évaluer leur maturité organisationnelle et leur capacité à établir des priorités d'amélioration et à mettre en œuvre ces améliorations. Un niveau de maturité correspond à l'atteinte d'un niveau de capabilité uniforme pour un groupe de processus.

Sur la base des éléments ci-dessus, la gestion de la maintenance est considérée comme une fonction stratégique dans les organisations. Par conséquent, une multitude de travaux traite du champ d'amélioration de la formulation, de la sélection et de la mise en œuvre des stratégies de maintenance pour les entreprises. Toutes ces activités sont clairement intégrées et surveillées de manière holistique. Pourtant, il semble y avoir des obstacles majeurs limitant l'efficacité des stratégies de maintenance proposées dans la littérature. Ces obstacles sont :

- Le manque d'engagement du personnel en raison de la mauvaise gestion des changements (Alvair et Gati, 2011);
- Le manque de connaissance des organisations sur les concepts et principes novateurs de la maintenance à cause de leurs complexités et de l'expertise nécessaire à leur mise en œuvre (Rajesh, Sandeep et Nikhil, 2014);
- Le gaspillage des ressources sur des équipements peu critiques et la mauvaise perception des besoins réels en maintenance (Singh et al., 2016).

En dépit de la mise en œuvre des meilleures approches de gestion de la maintenance, les gestionnaires d'entreprise à faible maturité demeurent confrontés à des barrières limitant les bénéfices attendus. Ce problème conduit à quelques questions de recherche concernant la formulation et la sélection des stratégies de maintenance. Ces questions sont les suivantes :

QR1. Comment les stratégies de maintenance sont-elles alignées sur les besoins réels des entreprises ?

QR2. Comment les gestionnaires d'entreprise peuvent-ils améliorer efficacement leur maturité avec les moyens et ressources à leurs dispositions ?

Les questions de recherche soulignent que l'alignement des activités de maintenance sur les réalités des entreprises est le principal défi pour les gestionnaires de la maintenance et la sélection des équipements critiques est une condition essentielle pour une mobilisation intelligente des ressources. Le but de ce projet est de mettre en œuvre un outil d'aide à la décision pour soutenir les organisations dans leurs activités et améliorer leurs maturités. Les objectifs spécifiques de recherche du présent mémoire se décrivent comme suit :

- Aligner les processus de maintenance avec les besoins réels des organisations;
- Caractériser et estimer la criticité du parc d'équipements;
- Mettre en œuvre une grille d'évaluation de la maturité en maintenance et déterminer les processus de maintenance nécessaires pour atteindre une gestion productive du parc d'équipements.

La méthodologie proposée dans ce mémoire suggère un changement de paradigme en maintenance et adopte une démarche évolutive depuis la maintenance des équipements critiques vers un déploiement sur les équipements moins critiques. Le présent mémoire réalise les objectifs de recherche en quatre chapitres :

- Le premier chapitre consacré à la revue de la littérature fait un état de l'art sur les stratégies de gestion de la maintenance. Il présente aussi les généralités de la maintenance et sa gestion;
- Le deuxième chapitre réservé à la méthodologie décrit les différents modules de l'outil d'aide à la décision et la manière dont les objectifs sont complétés;
- Le troisième chapitre expose les résultats obtenus lors de l'application de cette trousse d'intervention au Laboratoire de recherche en Imagerie et Orthopédie (LIO) de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS);
- Le dernier chapitre dédié à la discussion débat de la méthodologie retenue et des résultats obtenus après application au LIO, sur la base des questions de recherche émises au départ.

Pour finir, comme toute activité de recherche, le document se termine par une analyse des limites de la trousse d'intervention ainsi que les différents aspects pouvant servir aux travaux futurs.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART DES STRATÉGIES DE GESTION DE LA MAINTENANCE

Dans ce premier chapitre consacré à la revue de la littérature, la maintenance est introduite par une définition, les objectifs, les méthodes et les outils. Suivis de la gestion de la maintenance à travers son contexte, sa structure et les systèmes déployés pour son monitorage. Le chapitre expose également les modèles et approches de gestion de la maintenance relevés dans la littérature.

1.1 Généralités sur la maintenance

Cette section présente les concepts généraux de la maintenance.

1.1.1 Définition de la maintenance

L’Office Québécoise de la Langue Française (OQLF) définit la maintenance comme : l’ensemble des opérations assurant en tout temps le bon fonctionnement d’un système, conformément à des spécifications définies. Cette définition de l’OQLF implique la mise à jour et l’amélioration continue du matériel et des logiciels, de façon à ce que les performances du système puissent suivre l’évolution technologique.

Toutefois, la maintenance de nos jours réunit plusieurs concepts. Dans une approche complète, la maintenance est l’ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d’un actif, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. Des concepts importants tels que le cycle de vie et le management sont maintenant partie intégrante de la maintenance.

1.1.2 Objectifs de la maintenance

Les buts de la maintenance sont fixés et acceptés pour les activités de maintenance. Ces buts peuvent comprendre la disponibilité, les coûts, la qualité des produits, la protection de l’environnement, la sécurité, etc. Ils sont exprimés à l’aide d’indicateurs permettant la mesure

objective de la performance. Selon la politique d'une organisation, les objectifs de la maintenance seront :

- La **disponibilité des actifs**, qui dépend à la fois de la fiabilité et de la maintenabilité. C'est un indicateur de performance clé dans le domaine de l'énergie et représente un enjeu majeur pour la gestion de la stabilité des réseaux électriques;
- La **sécurité des personnes et des actifs**, qui une fois intégrée à tous les niveaux d'une organisation devient la responsabilité de tous et représente une valeur ajoutée;
- La **qualité des produits ou services**, pour garantir la réputation d'une organisation et améliorer les processus. C'est une réalité qui permet au manufacturier de vendre plus et mieux;
- L'**optimisation des coûts de maintenance**, qui représente un levier de compétitivité. En effet, les coûts de maintenance d'une usine manufacturière entrent dans le prix de reviens des produits.

La politique de maintenance conduit, en particulier, à faire des choix entre maintenances : préventive ou corrective, systématique ou conditionnelle, internalisée ou externalisée.

1.1.3 Types de maintenance

Dans le cadre d'une politique de maintenance adoptée dans une organisation, les responsables sont conduits à envisager plusieurs stratégies de maintenance adaptées aux enjeux techniques, économiques et organisationnels. C'est dans le cadre de ces stratégies que l'on définit l'ensemble des types de maintenance qui seront appliqués.

1.1.3.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective est exécutée après la détection d'une panne et destinée à remettre un actif dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. Ce type de maintenance peut être :

- **Palliative** : sa réalisation atténue provisoirement l'effet d'une défaillance afin d'assurer la continuité de l'exploitation de l'actif sans pour autant traiter les causes. L'action effectuée est presque toujours une action de dépannage, complétée par une action de fond destinée à traiter la cause première;

- **Curative** : cette action s'attaque réellement aux problèmes fondamentaux en traitant la cause première, si tant est que le diagnostic ait permis de remonter jusqu'à cette cause première.

1.1.3.2 Maintenance préventive

La maintenance préventive 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 actif. Elle peut être :

- **Programmée** : son exécution respecte un calendrier préétabli ou un nombre défini d'unités d'usage;
- **Systématique** : son exécution est identique à celle de la maintenance préventive programmée, mais sans contrôle préalable de l'état de l'actif. Il faut donc retenir que toute action de maintenance programmée n'est pas obligatoirement systématique;
- **Conditionnelle** : son exécution est basée sur une surveillance du fonctionnement de l'actif ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. La surveillance dont il est question peut être réalisée selon un calendrier, à la demande ou même en continu;
- **Prévisionnelle** : son exécution est déclenchée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation de l'actif. Lorsqu'elle est techniquement réalisable et économiquement rentable, cette forme de maintenance est la plus élaborée et optimale.

1.1.3.3 Maintenance améliorative

L'amélioration d'un actif consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformations sur un matériel. La maintenance améliorative est effectuée dans le but d'ajouter des fonctions nouvelles ou supplémentaires. Il s'agit d'une attitude créative et pour toute maintenance d'amélioration, une étude économique sérieuse s'impose pour s'assurer de la rentabilité du projet. Les raisons pouvant déclencher une action améliorative sont multiples et elles impliquent le plus souvent des activités de rénovation, reconstruction, modernisation et mise à jour.

1.1.3.4 Autres types de maintenance

Étant donné que la maintenance actuelle est une activité multidisciplinaire, elle intègre de nombreux concepts qui ne cessent d'évoluer avec les innovations technologiques. Quelle que soit la forme de maintenance ou l'appellation qu'elle porte, il faut reconnaître que la maintenance fondamentalement est préventive ou corrective. Loin d'être une liste exhaustive, voici d'autres types de maintenance :

- **Automaintenance** : son exécution est déclenchée par l'actif lui-même. L'actif auto détecte une panne ou prédit une défaillance future, diagnostique et exécute de manière autonome l'action corrective requise;
- **E-maintenance** : son exécution requiert l'utilisation des Technologies de l'Information et de la Communication au service de la maintenance (TIC). Les TIC sont utilisées ici dans le développement d'un système de soutien à la maintenance des actifs.

1.1.4 Opérations de maintenance

Ne sont présentées ici que les opérations essentielles.

1.1.4.1 Opération de maintenance corrective

Parmi toutes les opérations de maintenance corrective réalisable par le personnel chargé de la maintenance des actifs, voici les plus importantes et spécifiques.

- **Dépannage** : il regroupe toutes les actions physiques exécutées pour permettre à un actif en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée;
- **Réparation** : c'est l'action physique exécutée pour rétablir la fonction requise d'un actif en panne. Lorsqu'elle est bien conduite, cette opération présente un caractère permanent et succède au dépannage effectué dans l'urgence;
- **Essai de fonctionnement** : il s'agit de la dernière étape d'une intervention de la maintenance. L'action est destinée à vérifier que l'actif est en mesure d'accomplir la fonction requise.

1.1.4.2 Opérations de maintenance préventive

Les opérations de maintenance préventive peuvent comprendre, mais sans toutefois s'y limiter :

- **Inspection** : C'est un contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un actif. En général, l'inspection peut être réalisée avant, pendant ou après d'autres activités de maintenance et elle regroupe les visites et contrôles;
- **Surveillance de fonctionnement** : C'est l'activité exécutée manuellement ou automatiquement ayant pour objet d'observer l'état réel d'un actif. La surveillance se distingue de l'inspection en ce qu'elle est utilisée pour évaluer l'évolution continue des paramètres de l'actif avec le temps.

1.1.4.3 Opérations de maintenance améliorative

- **Amélioration** : c'est l'ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destiné à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un actif sans changer sa fonction requise;
- **Modification** : c'est l'ensemble des dispositions techniques, administratives et de gestion, destiné à changer la fonction d'un actif;
- **Reconstruction** : l'objectif de la reconstruction est de donner à un actif une vie utile qui peut être plus longue que celle d'origine. Cette action requiert le démontage de l'actif et la réparation ou le remplacement des composants qui approchent de la fin de leur durée de vie utile.

1.1.5 Outils de maintenance

Les outils de la maintenance sont nombreux pour tenir compte de la nature de l'intervention et du degré d'analyse.

1.1.5.1 Outils d'analyse de défaillance

La conduite des opérations d'analyse de défaillance se nourrit de :

- **Organigramme de diagnostic** : il permet la vérification des hypothèses émises durant la démarche de localisation des défaillances. Une liste des origines possibles des pannes est établie puis vérifiée afin de déceler la cause première;
- **Diagramme de causes et effet** : il présente de façon graphique les causes aboutissant à un effet. Encore appelé diagramme des 5 M, la maîtrise de la maintenance requiert une excellente exploitation de cet outil qui est illustré dans la figure suivante;

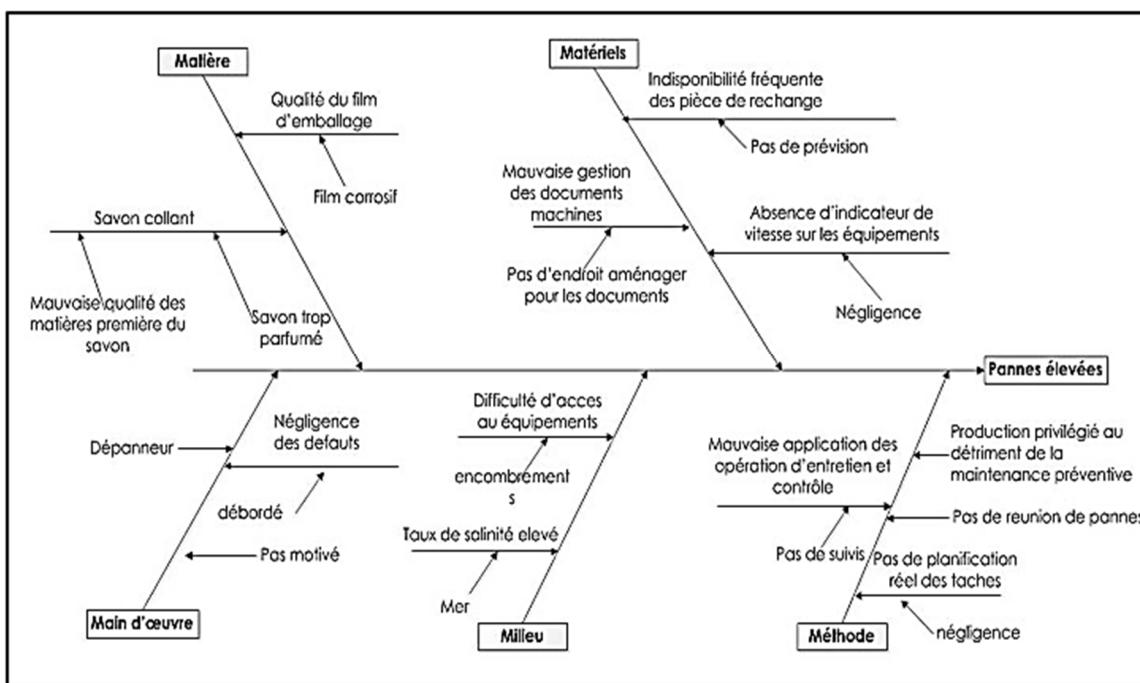


Figure 1-1 Diagramme de causes-effet

- **Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité** : c'est une démarche collective pour identifier toutes les défaillances possibles, analyser leurs causes et estimer les risques d'occurrence dans une conception, un processus de fabrication, un produit ou un service final. Le systématisation et exhaustivité sont assurés par l'examen de chaque mode de défaillance pour tous les composants du système et un pouvoir décisionnel pour engager des mesures correctives.

1.1.5.2 Outils de contrôle et de surveillance

Le rendement des actifs et leurs maintiens en puissance sont grandement améliorés lorsque l'équipement est conservé en bonne condition. Pour ce faire, une maintenance de base doit être effectuée régulièrement et les procédures d'inspection de base incluent des contrôles.

- **Analyse vibratoire** : c'est un outil de détection puis de diagnostic de défauts de fonctionnement des équipements. Elle consiste à analyser en fonction du temps les oscillations mécaniques d'un système autour d'une position de référence au moyen d'un ou de plusieurs capteurs. Les oscillations ou vibrations mécaniques sont produites soit par le système en fonctionnement (un moteur par exemple) soit sont induites par des sollicitations externes (par impact ou en sollicitation forcée);
- **Thermographie** : c'est une technique qui enregistre les températures des composants d'un système par détection des rayonnements émis. L'étude de la signature thermique d'un système ou de ses composants permet de déterminer les zones d'échauffement qui sont souvent caractéristiques de la dégradation du système;
- **Analyse d'huile** : c'est un outil complémentaire des suivis par analyses vibratoires et thermographiques. Il permet de détecter et de suivre les dysfonctionnements des équipements grâce au niveau de pollution des huiles. En déterminant les causes de dégradation des lubrifiants, la maintenance dresse un diagnostic de fonctionnement des machines et peut alors remédier aux problèmes avant que de véritables incidents ne conduisent à des arrêts coûteux.

1.2 Gestion et planification de la maintenance

1.2.1 Gestion de la maintenance

Marquez et al., (2009) ont défini un processus de gestion de la maintenance et ont classé les techniques de maintenance requises pour son fonctionnement. Un modèle générique intégrant d'autres modèles relevés dans la littérature a été proposé pour gérer la maintenance, il est composé de huit blocs de gestion séquentielle. Chaque bloc représente une zone de décision clé pour la maintenance des actifs et la gestion du cycle de vie. Des méthodes et techniques de maintenance développées dans chaque bloc permettent de piloter et faciliter les processus de

prise de décision. La structure porteuse du processus de gestion de la maintenance présentée par les auteurs se concentre essentiellement sur l'efficacité des actifs, le rendement, l'évaluation des performances et l'amélioration continue. Les résultats de ces travaux offrent une vision pratique sur l'ensemble des activités de maintenance et une classification des outils d'ingénierie indispensables à une bonne gestion de la maintenance. Les auteurs soutiennent que des niveaux plus élevés de connaissances, d'expérience, de formation et de techniques couvrant l'implication des opérateurs dans l'exécution de tâches de maintenance simples seront extrêmement importants pour atteindre des niveaux supérieurs de qualité de maintenance et d'efficacité globale des équipements.

Dans le souci de répondre aux difficultés d'exploitation des solutions de maintenance traditionnelles (RCM, TPM, etc.), Naughton et Tiernan (2012) ont proposé un modèle pour guider les organisations dans l'adoption et l'implémentation d'un système de gestion personnalisé de la maintenance. Ces auteurs soutiennent que malgré le scepticisme et le faible respect des praticiens dans la conception d'une maintenance personnalisée, son intégration offre des résultats tangibles. Leur stratégie de gestion personnalisée de la maintenance se résume en neuf étapes :

- Définition des objectifs;
- Identification des contraintes;
- Classification des systèmes;
- Classement des équipements;
- Sélection de la politique de maintenance;
- Alignement des indicateurs de performance;
- Structuration des données de maintenance;
- Mise en œuvre et suivi;
- Rétroaction.

Le modèle a été déployé pour application dans une grande usine de production de verre où le module de maintenance des équipements est détaché de la planification des ressources. Les résultats de l'enquête d'appréciation pré intervention et post intervention ont démontré clairement le succès d'intégration de l'approche. Après leur étude, les auteurs ont conclu

qu'une politique de surveillance prédictive serait la plus appropriée à cette organisation. Ils ont également conçu des indicateurs de performances intégrant les données aléatoires des événements qui se produisent au cours des opérations de production. Le modèle en neuf étapes de gestion personnalisée de la maintenance décrit dans cette recherche est un véritable succès, principalement en raison de l'engagement de toutes les parties prenantes concernées et malgré le scepticisme des parties concernées au début du processus.

1.2.2 Planification de la maintenance

Les stratégies de planification de la maintenance des systèmes à plusieurs composants entraînent des pénuries d'entretien ou des excédents, alors que l'information de la dégradation du système est le plus souvent ignorée. Pour remédier à ce problème, Qinming et Wenyuan (2015) ont présenté un modèle intégrant les informations de dégradation pour planifier les opérations de maintenance menées sur les systèmes multicomposants. Il s'agit d'une approche multi phase combinée à un algorithme de solution itérative qui évalue la dégradation des systèmes multi-composants afin d'optimiser la planification des opérations de maintenance. Afin de mieux analyser les stratégies de planification des systèmes multicomposants, un modèle de défaillance général de Weibull et un modèle de défaillance amélioré en fonction du facteur de dégradation et des facteurs de récupération ont été considérés. Ensuite, le modèle mathématique du coût total d'optimisation de la maintenance du système multicomposant a été défini par la somme des coûts de maintenance, des coûts des défaillances, des coûts des ressources et des coûts des temps d'arrêt. Avec C_{Total} représentant le coût total de l'optimisation de la maintenance du système, $C_{j,t}$ indiquant le coût total de la j ème activité de maintenance, c_q décrivant le coût de démarrage du système lorsqu'une activité de maintenance est exécutée, (m) étant le nombre total d'activités de maintenance dans la durée de vie du système et D la durée de vie du système. Le modèle mathématique de planification de la maintenance s'écrit :

$$C_{Total} = \left(\sum_{j=1}^m C_{j,T} + m \times C_q \right) / D \quad (1.1)$$

Cette approche se conclut par l'utilisation d'un algorithme générique pour déterminer la solution la plus optimale de l'équation mathématique et les éléments de base sont le décodage, la sélection, le croisement puis la mutation. L'algorithme générique produit des approximations améliorées de la fonction C_{Total} sur un certain nombre d'itérations et sa solution optimale représente la meilleure stratégie de planification de la maintenance.

1.2.3 Politique de maintenance

La politique de maintenance joue un rôle clé dans la réalisation des objectifs d'une organisation. Elle contribue à réduire les temps d'arrêt des équipements, améliorer la qualité et augmenter la productivité. Ilangkmaran et Kumanan (2009) ont produit une approche multicritère de prise de décision pour déterminer la stratégie optimale de maintenance. Les auteurs ont tout d'abord combiné la théorie des ensembles flous avec un processus de hiérarchisation analytique pour surmonter les incertitudes et les imprécisions associées à la cartographie de la perception des nombres exacts des décideurs. Une technique d'ordre de préférence par similarité à la solution idéale est ensuite utilisée pour classer les alternatives de sélection d'une politique de maintenance appropriée. Leur méthodologie de hiérarchisation analytique est un puissant outil multicritère d'aide à la décision structurant hiérarchiquement le problème de décision en plusieurs niveaux où les aspects qualitatifs et quantitatifs sont pris en compte. En combinant cet outil multicritère à la théorie des ensembles flous, les rapports de comparaison incertains sont exprimés sous la forme d'ensembles flous. Ainsi, tous les éléments de la matrice de jugement et des vecteurs de pondération sont représentés par des nombres flous triangulaires. Quant à la technique de sélection de la politique de maintenance appropriée, elle est basée sur un concept simple et intuitif qui s'appuie sur des critères cohérents et systématiques (conditions environnementales, types de défaillance, besoin de formation, etc.) pour définir l'alternative (maintenance prédictive, maintenance axée sur la fiabilité, maintenance réactive, etc.) la plus proche de la solution idéale, mais aussi la plus éloignée de la pire solution.

Suite à une analyse des approches multicritères d'aide à la décision et de leurs applications dans la sélection des politiques de maintenance, Shafiee (2015), révèle que :

- Quatre types de techniques sont utilisés pour la collecte des données. Parmi les publications revues, seule l'étude de Azadivar et Shu (1999) a utilisé une technique expérimentale et neuf autres études ont utilisé des techniques d'observation et d'enregistrement des évènements;
- Deux modèles sont appliqués pour résoudre le problème de sélection de la politique de maintenance. Le modèle classique, dans lequel les cotes et les pondérations des critères sont exprimées par des nombres précis. Le modèle flou, dans lequel les cotes et les pondérations des critères sont évaluées en fonction de l'imprécision et sont exprimées par des nombres flous;
- Les critères quantitatifs et qualitatifs considérés sont le plus souvent économiques, techniques, sociaux et environnementaux;
- La distribution des publications revues sur les différentes stratégies de maintenance désigne les opérations correctives, prévisionnelle et prédictive comme favoris dans le choix des auteurs;
- Parmi toutes les méthodes multicritères d'aide à la décision utilisées afin de trouver les meilleures options de maintenance pour les équipements. Les processus de hiérarchisation analytiques (AHP) et les techniques d'ordre de préférence par similarité à la solution idéale (TOPSIS) sont les plus couramment utilisés.

1.2.4 Efficacité de la maintenance

La bonne gestion de la maintenance garantit un retour d'investissement et fournit un support dans la continuité des activités pour atteindre les objectifs d'une organisation. Cependant, l'absence ou le manque d'implication et de participation des acteurs clés à la gestion de la maintenance limite l'amélioration continue des performances de la maintenance. Ainsi, Au-Yong et al. (2017) ont adopté une approche mixte pour déterminer les relations entre l'implication des acteurs clés dans la gestion de maintenance et son efficacité. Le modèle collecte et combine des données de différentes sources généralement qualitatives et quantitatives, cette méthodologie mixte se résume en trois étapes :

- Premièrement, les principaux acteurs clés dans la gestion de la maintenance et leurs influences sur son efficacité sont déterminés à travers une revue. On y compte entre autres

le gestionnaire de la maintenance, le personnel de maintenance, les utilisateurs, la direction et les fournisseurs;

- Ensuite, le degré de participation des acteurs clés à l'efficacité de la maintenance est évalué par des questionnaires. Une analyse de fiabilité de l'implication des principaux acteurs dans la gestion de la maintenance est réalisée afin d'améliorer la fiabilité des données. Un test de corrélation est également conduit pour mesurer la relation entre l'implication des acteurs clés de la gestion de la maintenance et son efficacité;
- Enfin, les entretiens semi-structurés sont effectués pour valider les résultats des questionnaires et obtenir plus de détails sur la compréhension de la participation des principaux acteurs clés à la gestion de la maintenance au vu de son efficacité.

Les conclusions de la présente étude ont montré qu'il existait une relation significative entre les principaux acteurs de la maintenance et la performance de la maintenance en termes de productivité et d'efficacité. Cette étude a également révélé qu'une communication étroite entre le gestionnaire et les autres acteurs clés est nécessaire pour garantir l'efficacité des travaux de maintenance. Globalement, la participation de tous les acteurs clés à la gestion de la maintenance est essentielle pour assurer l'efficacité de la maintenance. Mais particulièrement pour le cadre de cette étude, l'implication des gestionnaires de maintenance et des fournisseurs représente significativement un indicateur prédictif de l'efficacité de la maintenance.

1.2.5 Externalisation de la maintenance

L'optimisation de la gestion des pièces de rechange est un levier clé de performance des activités de maintenance. Cette tâche est généralement centrée sur la gestion interne des stocks de pièces détachées, mais Kazemi et Mustapha (2014) ont examiné le problème de la logistique des pièces de rechange dans le contexte de la planification des opérations d'un prestataire externe de maintenance. Les fournisseurs de maintenance tiers sont généralement confrontés à des échéances strictes pour la livraison des équipements réparés. Par conséquent, leur plan d'inventaire de pièces de rechange doit être coordonné avec les opérations de maintenance et les dates d'échéance promises. Les auteurs ont donc développé un modèle de programmation mathématique pour formuler le problème de la logistique des pièces de rechange et la

planification des opérations d'un fournisseur externe de maintenance. La fonction objective du modèle minimise les achats des pièces de rechange, les coûts d'inventaire et les pénalités pour livraison tardive. Les résultats de l'application du modèle ont révélé un surclassement du pire scénario, ce qui démontre la robustesse de l'approche.

1.3 Ordonnancement de la maintenance

1.3.1 Dégradation des systèmes et des composants

En explorant la piste d'amélioration de la maintenance conditionnelle, Nipat et Kumar (2016) ont présenté un modèle des interactions existantes entre les états et les taux de dégradation des composants d'un système. En effet, le déclenchement d'une opération de maintenance dans une politique de maintenance conditionnelle repose principalement sur l'état de dégradation d'une ou de plusieurs pièces. La démarche adoptée par ces auteurs est pertinente pour optimiser ce type de maintenance. L'approche regroupe un modèle de dégradation indépendant et un modèle des taux de dégradation itératifs. Pour développer ces modèles, les auteurs ont considéré un système composé de N composants inspectés périodiquement pour relever les états de dégradation. L'historique des données de dégradation a été recueilli pour construire une expression de l'état et de la vitesse de dégradation de chaque composant. Le modèle de dégradation indépendant est représenté non seulement en fonction du temps, mais aussi en fonction de l'âge et une régression linéaire multiple en donne l'estimation. En tenant compte des interactions entre les composants dans le modèle indépendant, le taux de dégradation d'un composant est influencé par les états des autres composants. Les auteurs ont appliqué le processus de régression gaussienne pour effectuer les estimations en raison de sa capacité à apprécier les données qui influencent la forme d'une fonction de régression. Le modèle itératif ainsi obtenu améliore les prédictions de dégradation des composants.

1.3.2 Inspection et intervalle de maintenance

Hameed, Khan et Ahmed (2016) ont présenté un travail novateur en intégrant pour la première fois le concept d'erreur humaine dans l'estimation des arrêts d'inspection et de maintenance optimale pour atteindre une fiabilité cible. Les auteurs sont partis du principe que plus le risque

d'erreur humaine pendant les inspections et les activités de maintenance sont élevés et plus la probabilité de dégradation ou de défaillance est grande. La méthodologie proposée se décompose en trois modules :

- Une matrice de criticité des risques pour sélectionner les équipements critiques afin de minimiser les ressources d'inspection et de maintenance. Les critères de criticités considérés sont la probabilité de défaillance et les conséquences de ces défaillances en valeur monétaire;
- Une modélisation des modes de défaillance des systèmes considérant l'erreur humaine, le modèle probabiliste utilisé pour estimer l'erreur humaine est représenté par une technique d'indexation des probabilités de réussite. Les facteurs de performance de chaque activité sont définis et leurs impacts sur le comportement humain sont mesurés par un indice de réussite. Chaque opération est examinée en fonction de ces facteurs de performances. Les jugements des experts techniques sont utilisés pour attribuer un classement et une pondération de chaque facteur de performance sur le succès de la tâche;
- Une estimation de la probabilité de défaillance des systèmes grâce au modèle de Weibull et une estimation économique des conséquences dues aux pertes d'actifs, aux pertes de la santé humaine, aux pertes de production et aux pertes d'arrêt d'inspection. Les auteurs ont exprimé la valeur monétaire du risque comme une combinaison de probabilité et de conséquence.

Dans cette étude, les auteurs ont réalisé qu'une inspection d'arrêt axé sur les risques et la maintenance aide à sélectionner les équipements et les systèmes critiques pouvant être inspectés ou entretenus sans mettre l'usine hors service.

1.3.3 Gestion du cycle de vie

La maintenance des équipements, à l'instar de tous les processus industriels, se compose de plusieurs phases permettant de gérer les équipements durant leur cycle de vie. Malheureusement, les différentes étapes ne sont pas toujours respectées, ce qui peut avoir des conséquences préjudiciables sur la qualité des choix à effectuer dans la gestion des équipements du parc machine. Afin de remédier à ces inefficacités, Schuman et Brent (2005)

ont soumis un modèle de gestion du cycle de vie des actifs intégrant les concepts d'ingénierie des systèmes et de fiabilité opérationnelle. L'approche débute par l'identification des besoins des actifs et se développe autour des différentes composantes du cycle de vie des actifs.

- Une représentation schématique des processus est réalisée pour montrer les principaux équipements et leurs paramètres de conception. Une structure de ventilation des systèmes est dérivée de cette représentation et un classement de criticité est établi sur la base des fonctions des principaux systèmes ou équipements;
- La représentation schématique des processus est développée en diagramme mécanique illustrant les modules et les interconnexions entre les pièces. Les équipements critiques sont soumis à une AMDEC qui fait suite à une RCM logique;
- Les données de défaillances sont collectées et insérées dans une GMAO pour construire une analyse de fiabilité. Une surveillance continue des états et des tâches de maintenance est déployée.

Le modèle proposé par ces auteurs guide les décisions prises au cours de la durée de vie des actifs pour augmenter les performances à long terme et réduire les coûts du cycle de vie.

1.3.4 Coûts de la maintenance

L'existence d'un système d'information efficace sur les coûts authentiques de maintenance est indispensable pour améliorer la rentabilité des entreprises évoluant sur un marché mondial très compétitif. En effet, la recherche d'un service de maintenance délivré par différents fournisseurs montre une différence remarquable de facturation. Afin de corriger ces inégalités, Ahmed (2015) a proposé un modèle d'estimation équitable des coûts de maintenance. Le modèle utilise la méthode de calcul des coûts par activité de maintenance comme alternative au système traditionnel de comptabilisation des coûts pour estimer les dépenses réelles de la maintenance. La méthodologie de l'auteur se résume en quatre étapes :

- Identifier les activités qui consomment des ressources et leur attribuer des coûts;
- Identifier les facteurs de coûts associés à chaque activité et leurs volumes attendus;
- Calculer les taux des coûts par unité de facteur de coût;

- Allouer les coûts aux services fournis par activité en utilisant le taux des frais généraux prédéterminé.

Les conclusions de cette étude montrent que l'application du calcul des coûts par activité permet d'acquérir de meilleures connaissances et d'estimer le coût des travaux de maintenance. De plus, l'approche met à jour les données de coûts en fonction des activités effectuées, ce qui pourrait être sauvegardé pour être utilisées à des fins de budgétisation et de contrôle.

1.4 Surveillance et analyse des équipements

1.4.1 Analyse et suivi des processus

L'optimisation ou le changement radical des processus de maintenance peut être complexe, prend du temps et mobilise des ressources considérables. Koskela et al. (2011) ont introduit une application sans fil de l'analyse des vibrations pour surveiller le colmatage du filtre d'une chaudière. En accord avec leurs objectifs de conception d'un système de surveillance sans fil à faible coût, les auteurs ont utilisé les techniques temporelles d'analyse de vibration (crête à crête, écart-type et écart absolu moyen) et des dispositifs Tmote pour la mesure des vibrations sans fil. Le degré d'enrassement du filtre a été mesuré par le calcul des indices temporels à partir de basses fréquences des échantillons de l'accéléromètre. Les résultats de cette étude ont révélé que toutes les techniques temporelles d'analyse vibratoire ont détecté l'obstruction du filtre, mais la meilleure performance a été obtenue avec la technique crête à crête détectant trois niveaux d'obstruction.

1.4.2 Pronostic et santé des équipements

La prédiction de l'état de santé des équipements est indispensable pour passer du mode d'urgence réactif au mode proactif et finalement à la fiabilité de classe mondiale. Les systèmes de surveillance et de pronostic de la santé des machines basées sur des données tangibles produisent des résultats remarquables tandis que les systèmes basés sur les caractéristiques artisanales présentent quelques insuffisances. Inspiré par le succès des méthodes d'apprentissage en profondeur qui redéfinissent la représentation de l'apprentissage à partir de données brutes, Zhao et al. (2018) ont proposé un modèle hybride combinant les

fonctionnalités artisanales à l'apprentissage automatique pour surveiller la santé des équipements. L'approche débute par l'extraction des caractéristiques des fenêtres temporelles, ensuite un réseau bidirectionnel d'unité récurrente fermée (système informatique inspiré des réseaux de neurones biologiques utilisant une mémoire pour traiter des séquences d'entrées) est appliqué à la séquence de caractéristiques locales générées pour en apprendre la représentation. Une couche d'apprentissage supervisé est finalement formée pour prédire l'état de la machine. Les résultats de trois opérations réelles de prévision d'usures d'une machine de fraisage à commande numérique ont vérifié l'efficacité et la robustesse de cette approche.

1.4.3 Analyse de fiabilité

Généralement, la fiabilité a pour objectif de garantir l'état de bon fonctionnement des équipements et de tout ce qui peut engendrer des arrêts de production afin d'assurer leur disponibilité. Cependant, la fiabilité n'a pas la même valeur pour toutes les entreprises, le type d'industrie et le contexte stratégique ont un impact décisif sur une telle démarche. Les indices de fiabilité dans l'industrie électrique telle que la moyenne des fréquences d'interruption et la moyenne des durées d'interruption sont adéquatement définies par l'institut de normalisation des ingénieurs électriciens et électroniciens dans la norme IEEE 1366 et servent le but pour lequel elles ont été développées. Schuerger et al. (2016) ont démontré la nécessité de mettre en place de nouvelles mesures de fiabilité afin de suivre la croissance explosive de l'industrie se déplaçant vers les réseaux intelligents et l'internet des objets. Ces auteurs ont proposé une approche destinée aux ingénieurs effectuant l'analyse de la fiabilité des systèmes de puissance industrielle et commerciale. Cette approche se positionne dans le contexte de l'insuffisance des indices de fiabilité définie par la norme IEEE 1366 dans la conduite d'analyse de fiabilité complète. Au terme des travaux de cette étude, les auteurs ont introduit deux nouvelles définitions dans la norme IEEE 1366 et ajouté trois nouveaux indices de fiabilité (moyenne des durées d'interruption pour les clients industriels, etc.) portant tous emphase sur les données clients. Notons que les détails spécifiques de cette étude ont été fournis au groupe de travail pour une révision de la norme.

1.5 Maturité de la maintenance

La fonction maintenance est normalement délimitée par des manœuvres tactiques et opérationnelles. Les performances techniques et économiques qui en résultent proviennent des décisions prises par la direction. La maturité de la maintenance est évaluée en termes de son efficacité managériale, organisationnelle et technologique. Cette évaluation est effectuée sur la base de critère et adresse les niveaux de maîtrise des pratiques en maintenance. Macchi et Fumagalli (2013) ont proposé une méthode d'évaluation de la maturité pour mesurer l'état des pratiques de maintenance afin de classifier les processus critiques d'une entreprise. Leur modèle d'évaluation de la maturité comporte cinq niveaux de maturité (initial à optimal) et examine les processus de dix tâches de maintenance pour estimer l'indice de maturité. L'approche est déployée à travers un questionnaire d'évaluation contenant un ensemble de pratique référé à un processus de maintenance et les réponses sont classées selon une description normative allant de la pratique initiale à la pratique optimale. Les résultats du questionnaire d'évaluation sont des scores liés à tous les processus et l'indice de maturité est défini comme la moyenne des scores.

Depuis l'émergence des industries 4.0, les entreprises manufacturières sont de plus en plus confrontées à des défis importants en ce qui concerne les concepts novateurs tels que l'internet des objets et les systèmes cyberphysiques. Schumacher et al. (2016) ont défini soixante-deux critères regroupés en neuf catégories pour évaluer la maturité d'une industrie 4.0. Cette approche d'évaluation de la maturité en trois étapes est identique à celle de Macchi et Fumagalli (2013) dans sa phase de mesure des éléments de maturité via un questionnaire. Mais diffère de cette dernière dans le calcul de l'indice de maturité, schumacher et al. (2016) ont introduit dans le calcul de maturité un facteur de pondération représentant l'importance attribuée à chaque élément de maturité. L'apport majeur de leurs travaux réside dans l'inclusion de divers aspects organisationnels donnant lieu à un modèle plus complet. Les premières validations de l'application du modèle dans plusieurs entreprises ont démontré sa transparence et son accessibilité en environnement réel.

1.6 Insuccès de la maintenance

La gestion de la maintenance est une démarche difficile à introduire dans une organisation surtout à ses débuts. En effet, elle est souvent décrite comme un voyage qui peut prendre plusieurs années et impliquer des efforts colossaux pour introduire et intégrer les changements nécessaires à mettre en œuvre pour fiabiliser son parc d'équipement. La mise en place d'un programme de maintenance est souvent compromise par le manque d'engagement du personnel en raison de la mauvaise gestion des changements (Alvair et Gati, 2011). Cela est principalement dû à l'absence d'alignement stratégique à tous les niveaux de l'organisation.

La Maintenance Productive Totale (TPM) est une approche novatrice de la maintenance qui détient le potentiel d'amélioration de l'efficacité des installations de production. Mais la mise en œuvre d'une TPM n'est pas une tâche facile, sa mise en place est minée par d'innombrables obstacles. Rajesh, Sandeep et Nikhil (2014) ont évalué l'intensité des barrières dans la mise en œuvre de la maintenance productive totale et les résultats de leur étude révèlent le manque de connaissance des organisations sur les concepts et principes de la TPM. Ce qui n'a rien d'étonnant puisque la plupart des organisations utilisent encore de vieux concepts de maintenance et les entreprises de faible maturité en maintenance n'ont aucune base pour songer déployer une TPM.

Dans l'exploration de l'écart entre la recherche universitaire et les pratiques de maintenance sur le terrain. Fraser, Hvolby et Tseng (2015) ont fait la lumière sur les différents modèles de gestion de la maintenance et leurs applications dans le monde réel. Les auteurs ont entrepris deux revues complètes de la littérature pour identifier et classer les différents modèles de gestion de la maintenance et pour déterminer la profondeur des preuves empiriques des modèles populaires dans les applications du monde réel. L'analyse descriptive des exemples pratiques et des preuves empiriques dans les journaux liés à la maintenance révèle que parmi plusieurs milliers d'articles scientifiques publiés sur les trois grands modèles de maintenance (RCM, CBM et TPM), seulement 8 % ont fourni des preuves empiriques ou des liens pratiques. Ce constat interpelle la vigilance des universitaires sur les réalités et les besoins réels du terrain. En effet, la majorité des modèles de maintenance relevés dans la littérature s'appuie sur des outils complexes et très sophistiqués (Hameed, Khan et Ahmed, 2016 ; Zhao et al., 2018 ; Tang

et al., 2015 ; Nipat et Kumar, 2016) tandis que les praticiens de la maintenance travaillent encore sur la maîtrise des vieux outils.

Un système performant de gestion de la maintenance joue un rôle crucial dans l'amélioration de la productivité et des performances globales des machines, ce qui donne à l'entreprise un avantage sur ses concurrents. Pour réussir à mettre en œuvre la gestion de la maintenance, les responsables doivent être conscients des barrières à la gestion de la maintenance et s'efforcer de les surmonter. Singh et al. (2016) ont identifié et classé par une technique de préférence par ordre de similarité à la solution idéale les principaux obstacles à la gestion de la maintenance. Les conclusions de cette étude désignent l'absence de stratégie adéquate, l'absence de mesures efficaces des performances, le gaspillage des ressources sur des équipements peu critiques et la mauvaise perception des besoins réels en maintenance comme facteurs responsables de l'insuccès de la maintenance.

1.7 Objectifs de recherche

À la lumière des éléments responsables de l'insuccès de la maintenance relevés dans la littérature, il est indispensable de mettre en œuvre une stratégie de gestion de la maintenance répondant aux besoins réels des organisations. Le présent document vise le développement d'une trousse d'intervention pour guider les organisations sur les processus de maintenance afin d'améliorer la maturité.

Les objectifs de recherche du présent mémoire se décrivent comme suit :

- Aligner les processus de maintenance avec les besoins réels des organisations;
- Caractériser et estimer la criticité du parc d'équipements;
- Mettre en œuvre une grille d'évaluation de la maturité en maintenance et déterminer les processus de maintenance nécessaires pour atteindre une gestion productive du parc d'équipements.

Les chapitres suivants décrieront les choix de conceptions, le développement ainsi que les détails de l'application de cette approche dans le Laboratoire de recherche en Imagerie et Orthopédie (LIO) à l'École de Technologie Supérieure de Montréal.

CHAPITRE 2

CONCEPTION DE LA TROUSSE D'INTERVENTION POUR UNE PRISE EN CHARGE DE LA MAINTENANCE

Ce chapitre dédié à la méthodologie décrit les différents modules de la trousse d'intervention, il offre les détails et explications sur les modèles utilisés dans la mise en œuvre de ladite trousse d'intervention.

2.1 Méthodologie

Pour que la maintenance puisse être planifiée et réalisée de manière cohérente et durable afin d'atteindre ses objectifs, toutes les activités de maintenance doivent être capturées via un système commun (Killick et Thomas, 2008). L'approche proposée dans ce document suggère un changement de paradigme en maintenance, plutôt que d'effectuer de la maintenance de base sur tout le parc d'équipement ou de gaspiller des ressources dans les approches complexes et sophistiquées nécessitant de grandes expertises. Les organisations pourraient adopter une démarche évolutive depuis la maintenance des équipements critiques vers un déploiement plus simple sur les équipements moins critiques.

La norme ISO 55000 en gestion d'actifs est une véritable boussole pour guider les entreprises dans la conduite des bonnes pratiques de gestion des actifs. En basant sur le respect de certaines exigences de cette norme, il serait possible d'aligner stratégiquement les pratiques de maintenance à tous les niveaux organisationnels. Les activités de maintenance seront ainsi connectées au plan stratégique de l'organisation, afin que chaque acteur reconnaissse sa contribution dans le succès collectif.

Les modèles d'évaluation de la maturité en maintenance développés dans la littérature permettent de mesurer la maturité des organisations, mais aussi de classifier les processus critiques. La démarche d'évaluation de la maturité présentée dans ce document met en évidence les tâches à réaliser afin de porter les organisations vers une gestion productive des actifs.

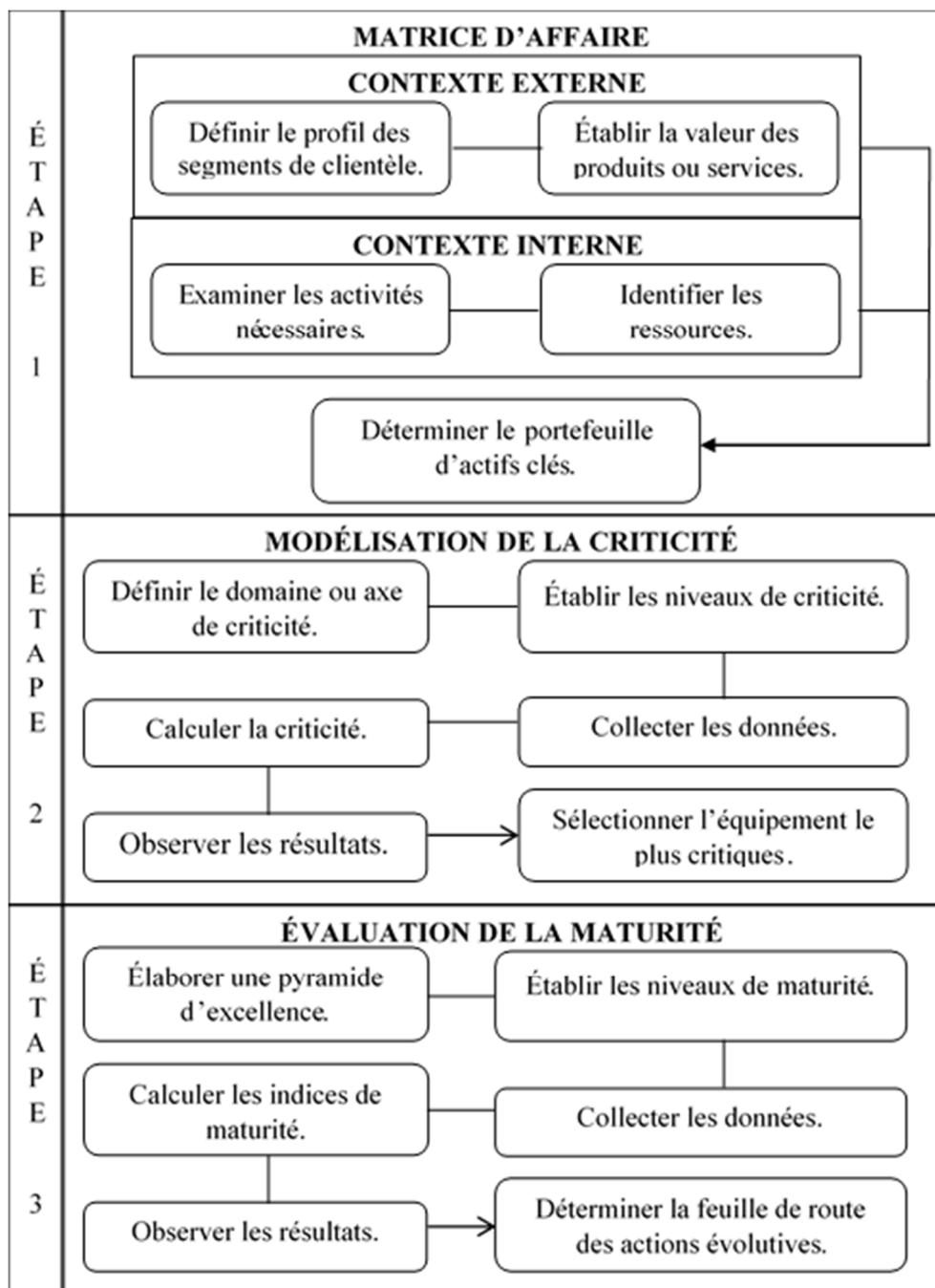


Figure 2-1 Approche en trois étapes de gestion de la maintenance

2.2 Matrice d'affaires

Ces dernières années, l'architecture commerciale a gagné en audience et s'est imposée comme une discipline distincte. Alimentée en partie par des approches et des efforts souvent centrés sur l'informatique, elle a développé ses propres méthodes et corpus de connaissances.

Il est largement reconnu qu'une gestion efficace de la maintenance nécessite une approche interdisciplinaire, dans laquelle des synergies devraient exister entre les disciplines traditionnelles. La gestion de la maintenance est un élément important et aussi complexe que les pratiques commerciales. La modélisation des processus commerciaux est proposée comme une approche permettant de conduire de manière intelligente la gestion de la maintenance via une connaissance exacte des enjeux internes et externes de l'entreprise.

Vladimir Frolov, Lin Ma, Yong Sun et Wasana Bandara (2010) ont développé une méthode d'identification des fonctions essentielles à divers types d'entreprise afin d'orienter les opérations de gestion d'actifs physiques. Le modèle d'affaires présenté dans ce document se place dans la même dynamique que les travaux de ces auteurs pour aligner les opérations de maintenance avec les contextes interne et externe de l'entreprise.

2.2.1 Architecture générale

Le Business Model décrit les principes selon lesquels une organisation crée, délivre et capture de la valeur (Osterwalder et Pigneur, 2011). Il montre le lien logique entre les clients, l'offre, les ressources, les partenaires, etc. Le Business Model Canvas est constitué de neuf blocs qui décrivent l'économie d'une entreprise et couvre les quatre grandes dimensions de l'entreprise.

Il est composé de :

- **Segments de clientèle** : définissant les différents groupes d'individus ou d'organisation que ciblent une entreprise;
- **Proposition de valeur** : décrivant la combinaison de produits et de services qui crée de la valeur pour un segment de clientèle donné;
- **Canaux** : décrivant les moyens de contact entre une entreprise et ses segments de clientèle pour leur apporter de la valeur;

- **Relations avec les clients** : décrivant les types de rapport qu'une entreprise établit avec ses segments de clientèle;
- **Sources de revenus** : représentant la trésorerie que l'entreprise génère auprès de chaque segment de clientèle;
- **Ressources clés** : décrivant les actifs les plus importants requis pour qu'un modèle économique fonctionne;
- **Activités clés** : décrivant les tâches les plus importantes à effectuer pour que le modèle économique fonctionne;
- **Partenariats clés** : décrivant le réseau de fournisseur et de partenaire grâce auxquels le modèle économique fonctionne;
- **Structure de coûts** : décrivant tous les coûts inhérents à un modèle économique.

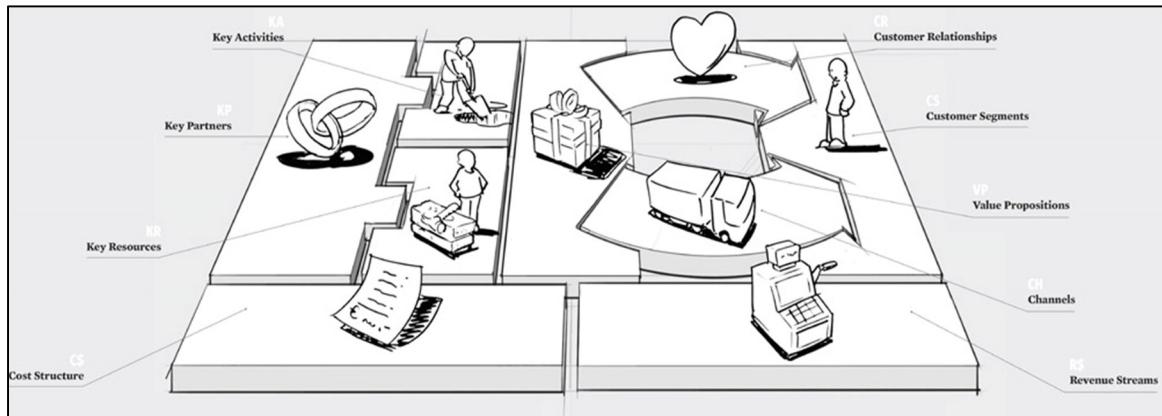


Figure 2-2 Matrice d'affaire en neuf blocs
Tirée de Osterwalder et Pigneur (2011)

La matrice du Business Model Canvas est un diagramme visuel décrivant des techniques de l'entreprise et aide les entreprises à aligner leurs activités en illustrant les arbitrages potentiels. Parmi les multiples avantages et bénéfices d'une matrice d'affaires, la première partie de ce chapitre traite du développement d'un modèle d'entreprise pour fournir une compréhension commune de l'organisation et aligner les objectifs stratégiques aux exigences techniques. En effet, la clause 2.5.3.2 de la norme ISO 55000 en gestion des actifs exige que les organisations examinent leur contexte externe et interne pour déterminer les questions pertinentes à leurs

objectifs et affectant leurs capacités à atteindre les résultats prévus. Les organisations doivent également définir leurs limites et applicabilités pour établir un champ d'action. La première partie de cette approche se base sur la matrice du Business Model Canvas et le respect de la clause 2.5.3.2 de la norme ISO 55000 pour :

- Définir le profil des segments de clientèle;
- Établir la valeur des produits et services destinés aux segments de clientèle;
- Examiner les activités nécessaires à la création de ces produits et services;
- Déterminer le portefeuille d'actifs requis pour le fonctionnement du modèle d'affaires.

L'alignement du parc d'équipements avec les objectifs et la politique de gestion d'actifs serait ainsi disponible en tant qu'information documentée.

2.2.2 Segments de clientèle

Les organisations créent des produits et services pour améliorer la vie de leurs clients. Le profil client est un moyen utile de représenter l'expérience client d'une organisation. Il se concentre sur les points de contact qui caractérisent l'interaction du client avec les services de l'organisation et aide à optimiser cette expérience. Les informations retenues pour définir le profil de la clientèle dans cette trousse sont :

- **Nom du client ou du groupe de client** : représentant l'intitulé ou l'appellation du segment de clientèle;
- **Description du client ou du groupe** : représentant les données générales sur le segment de clientèle;
- **Activités** : représentant les travaux effectués par le segment de clientèle. Ces travaux peuvent être fonctionnels, sociaux, émotionnels ou de toute autre nature;
- **Préoccupations** : représentant les difficultés que le segment de clientèle rencontre dans la réalisation de ses activités, les préoccupations sont les résultats négatifs que le segment de clientèle désire éviter;
- **Bénéfices** : représentant les résultats positifs que le segment de clientèle attend.

Cette carte de profil client permet de visualiser et de comprendre les personnes pour lesquelles l'organisation crée de la valeur.

2.2.3 Proposition de valeur

Il s'agit ici de la combinaison de produits ou services qui crée de la valeur pour un segment de clientèle, la proposition de valeur détermine le choix du segment de clientèle sur une entreprise ou une autre. Elle apporte une solution à un problème et se compose d'un ensemble défini de produits ou services répondant aux exigences d'un segment de client donné. La carte de proposition de valeur développée dans ce mémoire décrit la liste des produits ou services qu'offre une organisation et est composée de :

- **Nom du produit ou service** : représentant l'intitulé ou l'appellation du produit ou service;
- **Caractéristiques** : représentant les détails ou traits dominants du produit ou service;
- **Solutions** : représentant les réponses aux préoccupations d'un segment de clientèle donné. Il décrit comment le produit ou service réduit, minimise ou élimine les difficultés d'un segment de clientèle;
- **Profits** : représentant les résultats positifs et bénéfices que le produit ou service crée au segment de clientèle. Il décrit comment le produit ou service crée, maximise et améliore les avantages et les gains que le segment de clientèle désire.

2.2.4 Activités clés

Cette section développe les actions indispensables pour créer et délivrer la proposition de valeur d'une organisation. Les activités clés varient selon le type d'organisation, elles concernent la conception, la fabrication et la livraison dans des quantités importantes et de qualité supérieure. Qu'une entreprise évolue dans le domaine de la production manufacturier, l'ingénierie de conseil, la gestion d'une chaîne logistique ou la recherche scientifique, son fonctionnement exige des tâches obligatoires à la création de sa proposition de valeur. La matrice d'affaire développée dans ce document définit les activités clés sur les éléments suivants :

- **Nature de l'activité** : représentant l'intitulé ou le type de la tâche;

- **Description de l'activité** : décrivant les grandes lignes de la tâche;
- **Délai** : représentant le temps nécessaire pour accomplir la tâche;
- **Coûts** : représentant le poids financier de la tâche;
- **Exigences de cette activité** : représentant les conditions ou les contraintes requises à la réalisation de la tâche;
- **Sous-traitance** : représentant la ou les parties de l'exécution de la tâche confiées à une tierce personne;
- **Déroulement** : représentant la succession d'étapes du processus d'exécution de la tâche;
- **Ressources nécessaires** : représentant la combinaison d'actifs mobilisée pour l'exécution de la tâche.

2.2.5 Ressources clés

Tout modèle économique est assorti de ressources clés, elles permettent de créer et de délivrer la proposition de valeur, de toucher des marchés, d'entretenir des relations avec les segments de clientèle et de générer des revenus. Les ressources clés sont les plus importants actifs requis au fonctionnement du modèle d'affaires. Les actifs indispensables à une organisation peuvent être physiques, financiers, intellectuels ou humaines. Le présent mémoire s'intéresse aux actifs physiques et le modèle d'inventaire qu'il propose assure le suivi des matériels du parc d'équipements. Le modèle d'inventaire dénombre et actualise les ressources clés de l'organisation sur trois grandes parties :

- **Identification de l'équipement**, comportant de façon claire et exhaustive la description, la localisation et la désignation du matériel;
- **Informations fabricant ou fournisseur**, présentant les détails sur le fabricant, la garantie et les exigences réglementaires;
- **Informations équipement**, regroupant les éléments propres au matériel comme son état ou les instructions d'utilisation.

2.2.6 Alignement des équipements aux besoins de l'organisation

La politique de maintenance passe-partout applicable à tout type d'actif, quelle que soit l'organisation demeure un objectif lointain. Le choix de la politique et la stratégie de maintenance doivent être justifiés et s'aligner sur la politique et la stratégie de l'entreprise. Le modèle d'affaires proposé dans ce document expose les liens logiques entre les segments de clientèle et la proposition de valeur. Il permet de comprendre les attentes des clients pour créer des gains et adresser des potentiels cachés, ce qui répond au problème de la compréhension du contexte externe de l'organisation.

Ensuite, la définition des activités clés nécessaires à la création de la proposition de valeur est automatiquement suivie d'un modèle d'inventaire qui liste les ressources clés elles-mêmes indispensables à la proposition de valeur. L'exploitation de ces ressources clés pour la réalisation des activités permettant la conception de produits adaptés aux exigences des segments de clientèle résume le fonctionnement de toute organisation et résout la question du contexte interne recommandé par la clause 2.5.3.2 de la norme ISO 55000. Il est donc possible d'observer les différentes connexions depuis la clientèle de l'entreprise à son parc d'équipements.

Cette première partie de la trousse d'intervention aligne les besoins réels de l'organisation pour la satisfaction des segments de clientèle à son portefeuille d'actifs.

2.3 Modélisation de la criticité des équipements

La défaillance des équipements d'une entreprise peut avoir des conséquences graves sur le personnel, l'environnement, le respect de la réglementation, sans parler des conséquences d'arrêts de production. L'évaluation de la criticité des équipements fournit la structure autour de laquelle une entreprise bâtit son plan de maintenance afin de prévenir les évènements regrettables. Cependant, la détermination de la criticité des équipements en cours d'exploitation, pose de nombreuses difficultés si l'on ne dispose pas de données réelles de retour d'expérience. Pour pallier à cette difficulté, il est nécessaire de faire appel à des méthodes qui reposent sur les connaissances d'un expert en comportement des équipements.

La technique d'évaluation de la criticité proposée dans la deuxième partie de cette trousse repose sur le vote d'experts ayant le plus de connaissances sur les équipements en utilisant un questionnaire. Cette approche ressemble à la méthode PIEU (Panne, Importance des équipements, État des équipements et Utilisation) développée par Yves Lavina.

À partir d'une matrice multicritère de cotation, le jugement collectif d'experts sur cinq domaines (quatre domaines pour le PIEU) concernant les spécificités de leurs équipements est recueilli et analysé pour définir le niveau de criticité et le domaine de criticité de chaque équipement. Cette méthodologie d'analyse de la criticité s'apparente à la première étape de l'approche cyclique d'amélioration continue de Rodrigo Pascual, Rodrigo Madariaga, Gabriel Santelices, David Godoy Enrique et Lopez Drogue (2016).

2.3.1 Domaine de criticité

L'analyse de la criticité ne fait pas seulement une classification hiérarchique des actifs entre eux, mais détermine aussi parmi deux actifs critiques appartenant au parc machine de l'entreprise, lequel prioriser dans l'adoption d'une politique de maintenance dépendamment des objectifs établis.

Dans le souci de rendre cet outil universel et permettre son utilisation par un large public, cinq domaines de criticité ou spécificités sont définis contrairement à Pascual et al. (2016) qui se sont limités à trois axes de criticité.

2.3.1.1 Criticité point de vue Taux de Rendement Globale (TRG)

Le Taux de Rendement Globale (TRG) est un indicateur clé de la performance généralement adoptée pour soutenir le Lean Manufacturing et la Total Productive Maintenance (TPM). Le TRG est défini par le rapport entre le temps utile (temps de fonctionnement) et le temps d'ouverture.

L'objectif de l'utilisation de cet indicateur pour modéliser la criticité est d'identifier l'équipement goulot des processus. Le présent document quantifie et qualifie les temps de non-production des équipements par :

- **L'indisponibilité**, c'est-à-dire l'incapacité de l'équipement à être en état d'accomplir sa fonction requise dans des conditions données, à un instant donné en supposant que la fourniture des moyens extérieurs soit assurée;
- **Le taux d'engagement et d'exploitation**, qui peut être traduit la quantité de produits ou de services générés par l'utilisation de cet équipement;
- **Le fonctionnement en performance réduite**, il s'agit ici de l'aptitude du matériel à remplir un service minimal pendant la réparation d'un module ou d'une unité défaillants;
- **La présence de matériel de secours**, qui consiste à disposer de plusieurs exemplaires d'un même équipement pour augmenter la capacité totale ou les performances d'un système et pour réduire le risque d'arrêt.

2.3.1.2 Criticité point de vue qualité

Afin de satisfaire les segments de clientèle et de fournir des produits et services correspondants à leur attente, l'entreprise doit s'assurer de la conformité de ces produits. Les entreprises doivent ainsi cibler les équipements de leur parc machine dont le fonctionnement influence directement la qualité de la proposition de valeur. Cette démarche renseigne également sur les pertes dues à la non-qualité, l'évaluation de la criticité dans le contexte de la qualité est effectuée sur :

- **Les résultats de performance**, qui est un outil utilisé pour suivre l'évolution de la qualité des produits ou services. Dépendamment du type d'entreprise, il peut être représenté par la mesure du taux de rebut;
- **La conformité des produits et services**, représentant un facteur clé du succès des entreprises. Il s'agit d'un élément incontournable dont il faut tenir compte en ce qui concerne l'élaboration de nouveaux produits;
- **Les opérations de fonctionnement**, reposant sur une bonne compréhension des activités clés et de la disponibilité des ressources nécessaires;
- **La fiabilité**, qui traduit l'aptitude d'un matériel à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée.

2.3.1.3 Criticité point de vue coûts

Le fonctionnement des équipements génère des dépenses que les organisations doivent maîtriser afin de surveiller la rentabilité de leur parc machine. Lorsque les coûts d'exploitation représentent le domaine de coûts le plus important, les coûts de fonctionnement deviennent importants dans les décisions relatives aux équipements. L'analyse des coûts d'exploitation des ressources est réalisée sur :

- **Les dépenses d'exploitation**, décrivant les frais associés à l'exploitation d'un matériel, d'un composant ou d'une pièce d'équipement;
- **Les frais de remplacement**, indiquant le montant d'argent qu'il faudrait défrayer au moment présent pour remplacer l'actif;
- **Les coûts de maintenance**, qui prend en compte toutes les dépenses engendrées par la pratique de la maintenance sur l'équipement;
- **Le montant d'acquisition**, correspondant au prix d'achat complet, majoré des frais de transport, d'installation, de déménagement ou de mise en service.

2.3.1.4 Criticité point de vue santé et sécurité

Les accidents du travail liés aux équipements se produisent à cause de l'accès aux pièces en mouvement d'une machine en fonction. Les organisations doivent maîtriser tous les risques relatifs à l'utilisation des matériels afin d'instaurer un environnement sécuritaire. L'analyse de la criticité sur la question de la santé et sécurité est effectuée sur :

- **Les dangers pour la santé humaine**, relevant de la responsabilité de la direction pour identifier tous les dangers potentiels dus à l'utilisation d'un actif;
- **L'exposition aux risques**, permettant de classer les risques par ordre de priorité;
- **L'innocuité**, relevant également de la responsabilité de la direction pour garantir la santé et la sécurité de toute personne interagissant avec le matériel potentiellement dangereux.

2.3.1.5 Criticité point de vue impact environnemental

L'exploitation de certains équipements peut engendrer des modifications fonctionnelles de l'environnement, les déviations de la dynamique naturelle aboutissant aux modifications de l'écosystème sont mesurés sur :

- **Les répercussions biophysiques**, qualifiant les préjudices portés à l'environnement dont les impacts affectent principalement la qualité de l'air, la qualité de l'eau, les ressources et la santé humaine;
- **Les éléments nocifs en entrées et sortis des processus**, représentant les substances susceptibles de causer de graves lésions si elles s'introduisent dans l'organisme;
- **Les risques et poids environnementaux**, qui prennent de plus en plus d'importance en raison de l'attention particulière que les citoyens et les consommateurs portent à tout ce qui est relié de près ou de loin à l'environnement.

2.3.2 Niveaux de criticité

Le niveau de criticité traduit la variabilité de l'importance des actifs d'une entreprise et oriente les décisions des investissements. Le modèle d'évaluation de la criticité des ressources clés est codé sur une échelle numérique afin que les traitements qui seront effectués soient significatifs. Les quatre échelles nominales définies pour représenter les niveaux de criticité décrivent le degré d'acceptation des experts relatif aux affirmations présentées sur chaque type de criticité. Traditionnellement, l'évaluation de la criticité ou du risque est réalisée en utilisant cinq degrés de priorité, mais l'approche d'analyse de la criticité sur quatre niveaux est ici réalisée en raison de la taille des entreprises et de l'utilisation simplifiée. Le score de pointage est attribué aux affirmations parmi :

- 1— **pas du tout d'accord**;
- 2— **peu d'accord**;
- 3— **assez d'accord**;
- 4— **tout à fait d'accord**.

2.3.3 Analyse et résultats

2.3.3.1 Collecte des données

Les experts ayant le plus de connaissance sur le fonctionnement des équipements expriment leurs jugements par attribution de scores aux affirmations relatives à chaque critère. Quatre affirmations sont construites sur chacun des cinq domaines décrivant les éléments critiques retenus. Un score choisi entre 1 et 4 est accordé à chaque affirmation selon le degré d'acceptation du répondant. Le pointage inscrit à chaque affirmation est recueilli dans une base de données pour traitement.

2.3.3.2 Calcul de la criticité

Après collecte des données, la somme des points est calculée pour chacun des cinq axes de criticité. Le nombre obtenu pour chaque domaine de criticité représente son poids sur la criticité globale de l'équipement. La criticité globale de l'équipement est définie par le total des poids de chaque domaine de criticité.

2.3.3.3 Résultats

Les résultats sont présentés sur un graphique en secteurs montrant le poids de chaque domaine de criticité sur la criticité globale de l'équipement. Il est alors possible d'estimer la criticité globale de chaque équipement afin de prioriser les actions de maintenance et d'observer les domaines critiques à chaque équipement pour orienter les objectifs de maintenance.

2.4 Évaluation de la maturité en maintenance

Avant de lancer un programme d'amélioration de la maintenance, il faut évaluer de manière approfondie les forces et les faiblesses du système actuel et déterminer quels domaines figurent en tête de liste des améliorations à apporter. L'examen de la maintenance permet de comprendre clairement les lacunes relatives aux pratiques et de voir les prochaines étapes nécessaires à la réalisation de la vision. Il est complet et couvre des questions stratégiques, procédurales, techniques, administratives et culturelles. Les résultats de l'évaluation de la

maturité n'ont aucun impact sur les buts et objectifs de l'entreprise, mais influent sur les décisions nécessaires à l'atteinte de ses objectifs. L'examen de la maturité en maintenance est effectué à l'aide d'une grille de performance de la maintenance en comparant les éléments d'une pyramide d'excellence aux pratiques actuelles pour donner un score quantitatif sur une échelle allant de l'entretien à la gestion productive.

2.4.1 Pyramide d'excellence de la maintenance

La maturité en maintenance d'une organisation est mesurée via ses capacités organisationnelles, managériales et technologiques. La plupart des modèles d'évaluation de la maturité développés dans la littérature sont fortement inspirés du modèle de maturité des capacités (CMM) présentées par Paulk et al. (1993). Ces auteurs ont défini des groupes de processus, où chaque domaine est constitué d'un ensemble homogène de pratiques clés pour le génie logiciel. Cette méthode a connu un grand succès et a ensuite été proposée comme solution, afin de couvrir une gamme d'activités et de pratiques clés liées à la fois au développement et à l'ingénierie de logiciels. Depuis lors, des modèles basés sur le CMM se retrouvent dans les domaines de la gestion de projet, de la conception, fiabilité, revues de projet et gestion de la maintenance.

Afin de définir les processus, la littérature sur les modèles de gestion de la maintenance examinée dans le chapitre premier de ce document a été une source d'inspiration. En particulier, les principales sources considérées sont : Marquez et al. (2009) ; Frazer et al. (2015) ; Killick et Thomas (2008) ; Macchi et Fumagalli (2013) et Uptime (2015). La pyramide d'excellence des pratiques de maintenance utilisée pour mesurer la maturité en maintenance dans cette trousse d'intervention est composée de six groupes et réunit les activités essentielles pour une gestion efficace de la maintenance.

2.4.1.1 Gestion de base

La maîtrise des processus de gestion de base requiert en premier l'établissement, la documentation et la mise en œuvre d'un programme de maintenance préventive et l'amélioration permanente de son efficacité. Ensuite, les contrôles et inspections

réglementaires pour garantir le bon fonctionnement des équipements et la continuité des opérations par avertissement des défaillances imminentes. Enfin, la planification et l'ordonnancement des activités en conformité avec un calendrier de maintenance pour guider les systèmes de maintenance à travers l'extrême variété des tâches. Ainsi, les processus définis dans le groupe de la gestion de base sont :

- **Processus de maintenance préventive**, pour améliorer la fiabilité du matériel;
- **Processus de contrôles et d'inspections**, pour détecter les symptômes de défaillance et veiller à ce que les paramètres de réglage et de fonctionnement soient respectés;
- **Processus de planification et d'ordonnancement**, pour une bonne coordination dans la prévision des arrêts selon le planning défini à l'avance et la prise en compte des impossibilités en fonction des impératifs de production.

2.4.1.2 Gestion des pièces et du matériel

Le stock de pièces et de matériels représente un investissement significatif, si l'on désire éviter des surcoûts importants, des délais rédhibitoires ou des arrêts de production. Ce stock doit être géré tout au long du cycle de vie de l'actif. Les processus de performances et les plans d'amélioration de l'inventaire représentent le groupe de gestion des pièces et matériels.

2.4.1.3 Gestion de la performance

Les mesures de performance sont parfois mal comprises et mal utilisées dans la plupart des entreprises. L'utilisation adaptée des indicateurs de performance met en évidence les possibilités d'amélioration. Les responsables d'entreprise doivent établir, mettre en œuvre et maintenir des procédures pour surveiller et mesurer les performances des équipements. De plus, ils doivent établir des exigences de façon détaillée pour surveiller de façon réactive et proactive l'enchaînement et le suivi des indicateurs de performance afin de mener des actions correctives et d'amélioration continue. Les processus définis dans le groupe de la gestion de la performance sont :

- **Processus d'amélioration**, débutant parfois de façon ponctuelle et souvent sous la contrainte de défaillance ou de défaut qualité;

- **Processus de suivis et de monitorage**, indiquant les états en temps réel du matériel grâce à des capteurs;
- **Processus de mesure par indicateur de performance**, représentant des éléments fondamentaux pour l'administration de la maintenance.

2.4.1.4 Système IT et OT

Le nombre important d'informations (techniques et budgétaires) dans le domaine de la maintenance nécessite l'apport de l'informatique de gestion afin de décharger les intervenants des principaux travaux administratifs. L'internet des objets est également un élément important de la stratégie numérique globale, permettant des améliorations à la fois en termes d'efficacité et de productivité. Le rôle principal d'une stratégie numérique est d'ouvrir la voie au changement dans une organisation. Ainsi les processus du groupe de système IT et OT sont :

- **Processus de la gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO)**, pour assister le service de maintenance dans ses missions;
- **Processus d'analyse de fiabilité et d'aide à la décision**, pour guider les choix du pouvoir décisionnel.

2.4.1.5 Fiabilité des équipements

Généralement, l'objectif de la maintenance est de garantir l'état de bon fonctionnement de l'outil de production et d'assurer sa disponibilité. La maintenance est d'autant plus efficace lorsqu'elle anticipe les défaillances des systèmes pour déterminer les actions adéquates, mais il faut préalablement maîtriser la fiabilité des équipements. Le groupe de fiabilité des équipements est composé des processus suivants :

- **Processus de maintenance basé sur la fiabilité**, qui à travers une approche globale descend jusqu'aux organes les plus élémentaires en utilisant l'outil AMDEC;
- **Processus d'analyse des défaillances des équipements**, représentant une investigation faite sur l'historique d'un échantillon pour connaître les causes particulières de l'occurrence d'un évènement.

2.4.1.6 Gestion des équipes

Il est reconnu par tous les acteurs de la fonction maintenance que la documentation joue un rôle très important dans la conception, la réalisation des actions de maintenance et l'exploitation d'un équipement. Pour assurer le bon déroulement des opérations, les entreprises déploient des mécanismes de coordination assurant l'articulation entre les tâches et les personnes. Elles s'assurent de l'intégration de chaque membre et veille à la création d'un environnement concurrentiel suffisamment motivant pour favoriser le développement personnel. La gestion des équipements est composée de :

- **Processus de documentation de la maintenance**, qui est l'un des piliers de la fonction maintenance et est indispensable à celle-ci dans l'accomplissement de sa mission. En effet, on ne conçoit pas un technicien réparé un matériel sans schéma, sauf à retrouver celui-ci progressivement en observant les circuits imprimés;
- **Processus de standardisation des savoir-faire et compétences**, pour répondre aux problèmes de transfert des compétences entre les anciennes et les nouvelles générations. Il ne suffit pas d'investir dans les équipements et procédés de pointe pour rester performant, surtout quand on fait face au départ de salariés chevronnés et que l'on œuvre à intégrer de nouveaux employés. Le risque d'accuser un déficit en termes de compétences et de savoir-faire est bien réel, d'où la nécessité de standardiser les savoir-faire et compétences;
- **Processus de supervision des équipes**, pour améliorer et perfectionner les pratiques ainsi que le soutien.

2.4.2 Niveau de maturité

Les pratiques de maintenance en vigueur dans l'organisation sont comparées aux éléments définis dans chaque groupe de la pyramide d'excellence afin de déterminer un score quantitatif sur une échelle allant de l'entretien à la gestion productive. Cette échelle représente le niveau de maturité et chaque processus de maintenance est associé à un niveau de maturité. En fonction de la manière dont un processus de la pyramide d'excellence est géré et exécuté dans l'organisation, un score de maturité est attribué. Si un processus est faiblement disponible ou

inexistant le score le plus bas est attribué, lorsque le processus fonctionne selon les bonnes pratiques le score le plus élevé est attribué. Les niveaux de maturité définis sont :

- **Maturité de score 1 pour l'entretien**, le processus sont faiblement contrôlé ou pas du tout contrôlé;
- **Maturité de score 2 pour la maintenance**, le processus est partiellement planifié ou la gestion du processus est faible en raison de lacunes dans le système organisationnel ou technique;
- **Maturité de score 3 pour la fiabilité**, les performances du processus sont mesurées et les causes des variations spéciales détectées, des analyses quantitatives sont effectuées. La gestion des processus est accomplie grâce aux responsabilités organisationnelles et aux systèmes techniques entièrement fonctionnels;
- **Maturité de score 4 pour la gestion productive**, le processus est géré en veillant à l'amélioration continue, les causes des défauts et des problèmes dans le processus sont identifiées en prenant des mesures pour éviter que des problèmes ne se reproduisent.

2.4.3 Questionnaire

La méthode d'évaluation de la maturité est pratiquement mise en œuvre au moyen d'un questionnaire. Il s'agit de l'outil utilisé pour recueillir les réponses du représentant de l'entreprise interrogée (normalement, l'interviewé est le responsable de la maintenance ou la personne ayant la meilleure connaissance pratique sur l'équipement). Un ensemble fermé de réponses déjà préparé dans le questionnaire est proposé à l'interviewé pour chaque question, la question contient un ensemble de pratiques référencées à un processus de maintenance cible et ses réponses sont classées selon une description normative allant de l'entretien (pratique de base) à la gestion productive (meilleure pratique). Un score est ensuite attribué à chaque question en fonction de la réponse de l'interviewé.

2.4.4 Analyse et résultats

2.4.4.1 Collecte des données

Le responsable de la maintenance ou le personnel ayant la meilleure connaissance pratique sur l'équipement exprime son jugement par attribution de scores aux questions relatives à chaque processus de la pyramide d'excellence. Un score choisi entre 1 et 4 est accordé à chaque question selon le niveau de maturité en maintenance des pratiques en vigueur par rapport à l'excellence. Le score attribué à chaque réponse est recueilli dans une base de données pour traitement.

2.4.4.2 Calcul de la maturité

Sur la base des réponses au questionnaire, il est alors possible de calculer tous les indices de maturité, soit un indice de maturité pour chaque groupe de processus et un indice de maturité général. Le résultat de l'interview est un ensemble de scores liés à tous les processus et groupe de processus. Afin d'avoir un score unique s'adressant à un groupe donné, l'indice de maturité spécifique à chaque groupe est calculé en tant que moyenne des scores obtenus par les processus le concernant. L'indice de maturité général mesurant les capacités du service de maintenance est calculé par la moyenne des indices de maturité spécifiques de chaque groupe. La procédure de calcul de l'indice maturité utilisée est une légère révision de ce qui a été proposé par Macchi et al (2011).

2.4.4.3 Résultats

Les résultats sont présentés sur une grille de performance où l'on observe les scores relevés via le questionnaire ainsi que les indices de maturité de chaque groupe et l'indice de maturité général.

2.4.5 Amélioration de la maturité

L'examen de maturité permet de mesurer l'état des pratiques de maintenance d'une organisation, il représente également un outil d'enquête sur les politiques de maintenance.

Étant donné que l'évaluation de la maturité est effectuée à des fins d'amélioration des pratiques de maintenance, elle est suivie d'une feuille de route donnant la structure claire des actions évolutives nécessaire aux progrès de la maturité. La précision et la pertinence de l'outil de maturité seront assurées en les maintenant dans le temps. L'accès et la fourniture des ressources nécessaires à la maintenance affecteront son évolution et son utilisation. La maintenance devient nécessaire à mesure que la connaissance et la compréhension des équipements s'élargissent et s'approfondissent.

CHAPITRE 3

APPLICATION DE LA TROUSSE D'INTERVENTION POUR UNE PRISE EN CHARGE DE LA MAINTENANCE

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de l'application de la trousse d'intervention pour la gestion de la maintenance au LIO. Il fournit également une compréhension des éléments de développement de la trousse d'intervention ainsi que les divers tests fonctionnels effectués.

3.1 Développement de la trousse d'intervention

Dans un contexte de développement d'outil informatisé, il est essentiel de considérer la nécessité d'amalgamer les particularités des utilisateurs avec les considérations qui permettent à l'outil de se conformer aux exigences spécifiques de chaque organisation. Afin d'opérationnaliser cette trousse d'intervention, voici les différents choix effectués pour sa mise en place.

3.1.1 Environnement d'utilisation

Les considérations retenues pour le développement de la trousse d'intervention exigent une disponibilité en mode agile, c'est-à-dire que le pilotage et la réalisation des processus de l'outil impliquent au maximum l'opérateur. Afin de faciliter l'accès à un grand public, la trousse d'intervention pour la gestion de la maintenance doit être accessible par une interface facile à manipuler et perméable aux modifications pour d'éventuelles personnalisations. Le développement et la programmation de la trousse d'intervention pour gérer la maintenance sont faits sur le logiciel tableur Excel de la suite Microsoft Office.

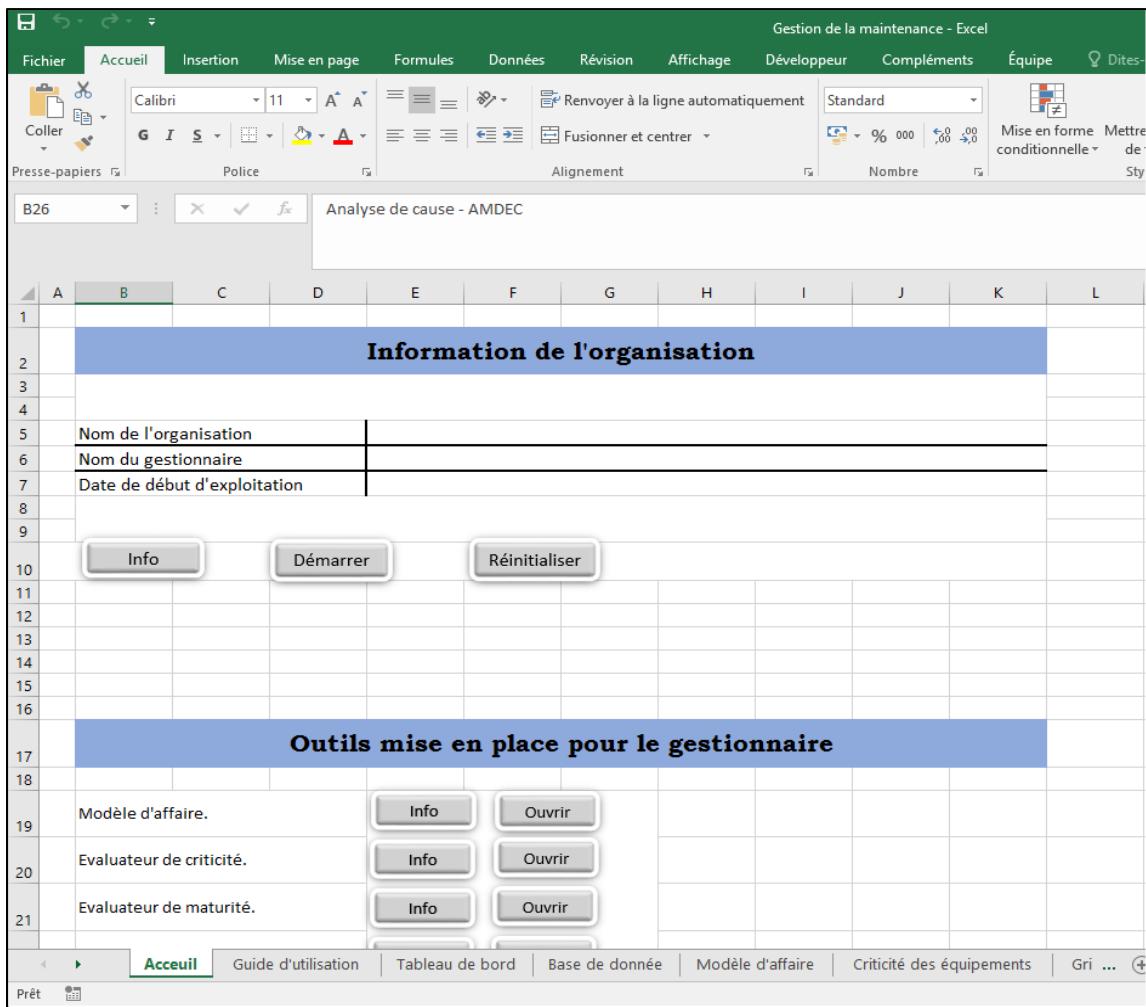


Figure 3-1 Environnement d'utilisation de la trousse d'intervention

3.1.2 Modules de la trousse d'intervention

L'outil mis en place pour fonctionner regroupe trois principaux modules.

3.1.2.1 Présentation des modules

Les modules de la trousse d'intervention pour la gestion de la maintenance sont déployés à travers une série de feuilles de calculs.

- **La matrice d'affaires**

Ce module comporte les neuf blocs définissant les principes selon lesquels une organisation crée, délivre et capture de la valeur selon le modèle proposé par Osterwalder et Pigneur (2011). Le segment de clientèle, la proposition de valeur, les activités clés et les ressources clés sont les blocs pris en compte dans ce modèle, les données relatives à ces blocs sont recueillies par des formulaires.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the title "Gestion de la maintenance - Excel". The spreadsheet contains a 3x3 grid of colored cells representing the Business Model Canvas. The columns are labeled A through L and the rows are numbered 1 through 25. The grid cells contain various icons and text related to business model components:

- Row 1:** Grey cells containing "Le Business Model" and "Désigné pour : Désigné par : Le :".
- Row 2:** Yellow cell containing "Partenaires clés" (with a network icon) and "Activités clés" (with a team icon).
- Row 3:** Yellow cell containing "Proposition de valeur" (with a box icon) and "Relations clients" (with a handshake icon).
- Row 4:** Blue cell containing "Ressources clés" (with a gear icon) and "Groupes de clients" (with a people icon).
- Row 5:** Orange cell containing "Canaux de distribution" (with a van icon) and "Pour qui créez vous de la valeur ? Qui sont vos principaux clients ?".
- Row 6:** Green cell containing "Sources de revenus" (with a hand holding a coin icon) and "Pour quelle offre de valeur patient-ils en ce moment ?".
- Row 7:** Grey cell containing "Coûts" (with a dollar sign icon) and "Quels sont les coûts les plus importants liés à votre modèle économique ? Quelles ressources clés sont les plus coûteuses ?".

The bottom navigation bar includes tabs for "Accueil", "Guide d'utilisation", "Tableau de bord", "Base de donnée", "Modèle d'affaire" (which is selected), "Criticité des équipements", and "Gri ...".

Figure 3-2 Matrice d'affaire de la trousse d'intervention

- **Le module d'évaluation de la criticité**

Le module ici présenté permet d'évaluer et de caractériser la criticité d'un équipement du portefeuille d'actifs clés sur cinq (5) catégories par une carte de pointage. Il est possible de

faire une évaluation individuelle ou collective dépendamment du nombre de responsables possédant le plus de connaissances techniques sur le matériel.

Figure 3-3 Grille d'évaluation de la criticité

• Le module d'évaluation de la maturité

Le dernier module de la trousse d'intervention pour gérer la maintenance évalue la maturité des processus de maintenance en vigueur dans une organisation sur la base des éléments définis dans la pyramide d'excellence. Le score de pointage est attribué en accord avec le niveau de maturité du processus de maintenance examiné.

Grille de maturité de la maintenance X

 LIO laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie	Critères <input type="checkbox"/> Gestion de base	Questions Qu'est-ce que la direction a fait pour mettre en place un programme de maintenance Préventive (MP) ?				* Cliquez sur suivant pour avancer à la prochaine question ou précédent pour revenir et corriger une réponse.	
						<input type="button" value="Précédent"/>	
						<input type="button" value="Suivant"/>	
Maturité niveau 1 Programme de maintenance préventive de base ou inexistant.		Maturité niveau 2 Développement d'un programme de MP en cours selon méthodes traditionnelles.		Maturité niveau 3 Programme de MP principalement systématique.		Maturité niveau 4 Programme de MP intégrant la maintenance conditionnelle.	
1 Entretien		2 Maintenance		3 Fiabilité		4 Gestion productive	
Pourquoi Afin de bien maîtriser tous les processus de gestion de base, un organisme doit établir, documenter, mettre en œuvre et maintenir un système de maintenance préventive et se doit d'améliorer en permanence son efficacité.		Qui La direction de l'organisation ou le gestionnaire.				* Entrer le pointage selon le niveau où se situe votre organisation dans la réalisation des processus.	
Commentaires spécifiques à l'utilisateur						<input type="button" value="Enregistrer"/>	
						<small>* Si vous faites une erreur fermer l'onglet et recommencer.</small>	
						<input type="button" value="Résultats"/>	

Figure 3-4 Grille de maturité de la maintenance

3.1.2.2 Automatisation des modules

La réalisation des tâches inhérentes à chaque module de même que le fonctionnement de chaque bouton de commande sont assurés par des macros. Elles enregistrent toutes les séquences d'actions et génèrent une procédure en Visual Basic for Applications (VBA) pour une réexécution identique.

Les modèles mathématiques de calcul de la criticité et des indices de maturité sont également programmés en VBA, un langage fonctionnellement riche et flexible de par la simplicité et la facilité de ses syntaxes et concepts.

3.1.2.3 Résultats des modules

Les données collectées sont enregistrées et réunies dans une feuille de calculs qui tient lieu d'une base de données. Les résultats de l'évaluation de la criticité sont présentés sur un graphique en secteurs comme illustré dans la figure suivante. On y voit le poids de criticité ainsi que les axes à surveiller.

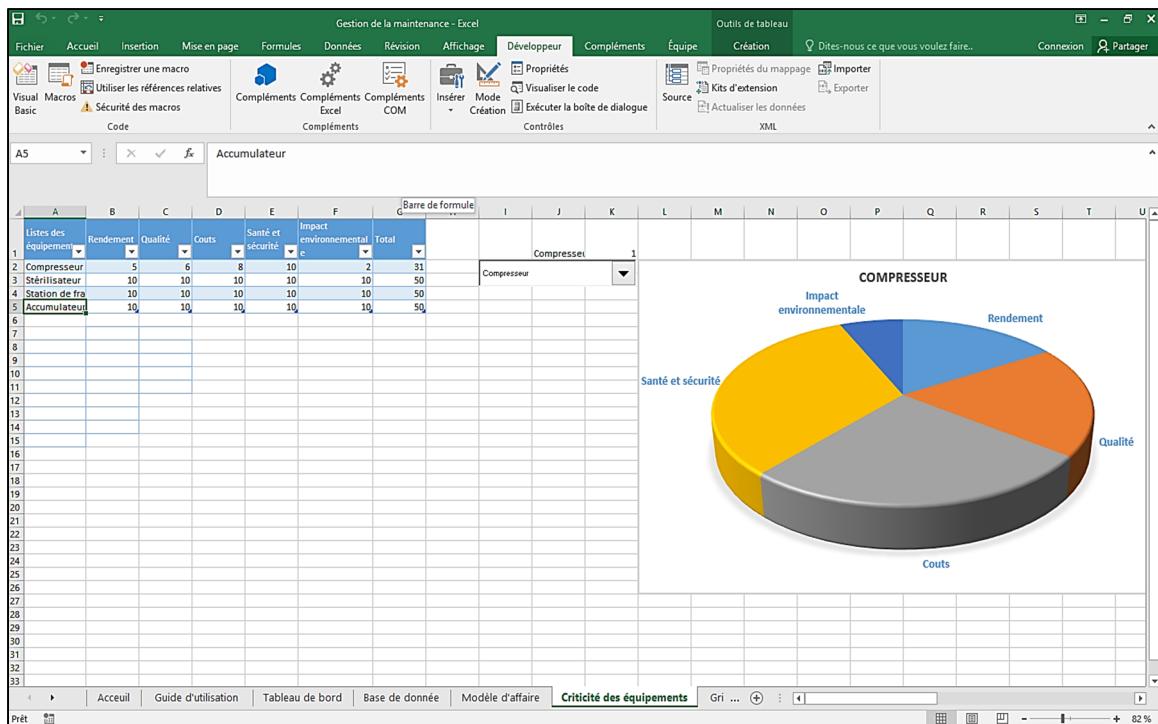


Figure 3-5 Sortie de résultats d'une évaluation de la criticité

Les résultats de l'évaluation de la maturité sont présentés dans le tableau 4.1, on y voit les différents scores ainsi que les indices de maturité.

Tableau 3.1 Résultats d'une évaluation de la maturité

Grille d'évaluation de la maturité en maintenance							
Calcul des cotes							
COMPRESSEUR							
Questions	Essentiels				Excellence		
	Gestion de base	Gestion des pièces et du matériel	Gestion de la performance	Systèmes IT—OT	Fiabilité des actifs	Processus Équipes	
	1 ^{re}	1	4	1	4	2	4
	2 ^e	2		2		1	
	3 ^e	3		3	1	3	2
Moyenne		2	4	2	2	2	2

3.2 Vérification de fonctionnement

Le test d'un logiciel est une activité qui fait partie du processus de développement. Il est mené selon les règles de l'assurance de la qualité et débute une fois que l'activité de programmation est terminée. Il s'intéresse aussi bien au code source qu'au comportement du logiciel. L'objectif ici consiste à minimiser les chances d'apparition d'anomalies avec des moyens automatiques ou manuels qui visent à détecter aussi bien les diverses anomalies possibles que les éventuels défauts qui les provoqueraient. L'activité de vérification fonctionnelle de cette trousse d'intervention se décline selon deux approches :

- **Recherche et corrections des défauts** (contrôle)

Une analyse structurelle des composants de chaque module et l'exécution des macros a été effectuée pour relever les erreurs et anomalies. La correction des défauts trouvés fait suite à un test de non-régression pour vérifier que les parties déjà testées n'ont pas été modifiées.

- **Test avec oracles des modèles mathématiques**

Des tests avec oracles ont été effectués pour vérifier la fiabilité des modèles mathématiques de criticité et de maturité, les résultats indiquent une bonne fidélité et l'absence de défauts. Un échantillon de données d'entrées est fourni aux modèles pendant une exécution et les résultats obtenus sont comparés aux résultats attendus.

3.3 Application de la trousse d'intervention au LIO

Cette section du document décrit l'application de la trousse d'intervention en trois étapes pour la gestion de la maintenance dans le laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie.

3.3.1 État des lieux au Laboratoire de recherche en Imagerie et Orthopédie

Le laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie (LIO) est un laboratoire multidisciplinaire accrédité de l'école de technologie supérieure de Montréal dont la sphère d'activités s'étend autour de l'imagerie médicale, de la biomécanique, des dispositifs médicaux, des aides techniques, des systèmes d'aide à la décision assistés par ordinateur et des biomatériaux. Les chercheurs du LIO, ingénieurs et cliniciens, travaillent en étroite collaboration à l'analyse morpho-fonctionnelle des systèmes biologiques, à la modélisation géométrique et fonctionnelle des organes et des articulations, ainsi qu'à la conception et à l'évaluation de méthodes de traitement et d'analyse d'images, de dispositifs médicaux, de prothèses et d'orthèses, d'instruments chirurgicaux et de robots médicaux.

Le laboratoire joue un rôle de fournisseur pour les fabricants de dispositifs médicaux, il ne fabrique pas de dispositifs médicaux, mais effectue des travaux de recherche qui permettent d'améliorer les connaissances dans le domaine et créer des prototypes. Le LIO est doté d'une politique qualité fournissant un cadre à la réalisation de ses projets, cette politique est définie pour faire de sa vision, non pas un idéal poursuivi, mais une réalité propre au laboratoire. Le système de gestion de la qualité du LIO met en œuvre les exigences de la norme ISO 13485 : 2016 — dispositifs médicaux — système de management de la qualité. Le matériel du LIO est réparti en deux catégories : les équipements d'évaluation de l'appareil locomoteur humain et les équipements d'imagerie. La majorité du parc d'équipement est géré par le LIO, mais la

maintenance de certains matériels utiles à la réalisation des activités du laboratoire est sous la responsable du centre hospitalier de l'Université de Montréal, ce dernier abritant les locaux du LIO. L'analyse pré intervention de la position du LIO dans la gestion de son parc d'équipements a révélé :

- La présence de procédures d'identification et de traçabilité des matériels et produits (le modèle d'inventaire est orienté management);
- L'existence de procédures d'enregistrements des évènements (aucun enregistrement des données de défaillance);
- L'utilisation de processus d'action corrective et préventive (ces actions concernent les non-conformités, les plaintes et les réclamations des clients);
- L'usage de fiche d'étalonnage et d'entretien de certains équipements (ces fiches ne décrivent aucune opération de maintenance).

Compte tenu des préoccupations techniques grandissantes et de la volonté de pérennisation des équipements du laboratoire de biomécanique, la direction du LIO comprend le besoin de disposer d'un système de gestion de la maintenance, mais manque de connaissance sur les concepts et principes de la maintenance pour mettre en œuvre un tel projet. Par ailleurs, l'exigence 6.3 du système de gestion de la qualité du LIO requiert l'application, la planification et l'ordonnancement des activités de maintenance sur le matériel.

3.3.2 Portefeuille d'actifs du LIO

En procédant à la première étape de la trousse d'intervention pour la gestion de la maintenance, l'outil a été soumis au responsable des matériels et son application s'est principalement portée sur le laboratoire de biomécanique du LIO. Il en ressort que la clientèle du laboratoire est composée majoritairement de divers organismes subventionnaires et de partenaires industriels pour lesquelles le laboratoire fournit du savoir. Les activités réalisées au sein du laboratoire sont nombreuses et l'on y compte entre autres l'analyse morpho-fonctionnelle des systèmes biologiques, la modélisation géométrique et fonctionnelle des articulations et l'évaluation de prothèses et d'orthèses. Parmi tous les équipements constituant le parc machine au laboratoire de biomécanique, cinq matériels ont été jugés clés en raison de leurs impacts sur la conduite

des activités du laboratoire et de la satisfaction de la clientèle qui sollicite ses services. Il s'agit de :

- Tapis roulant instrumenté AMTI;
- Système de camera VICON;
- Casque de réalité virtuelle;
- Système d'électromyographie;
- Système de capteurs inertIELS Xsens.

3.3.3 Matériels critiques du LIO

L'évaluation de la criticité de ces cinq ressources clés a été effectuée afin d'identifier le matériel critique et de caractériser la nature de sa criticité, mais aussi d'obtenir un classement des ressources clés par ordre de criticité. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.2, le tapis roulant instrumenté AMTI du laboratoire se trouve en tête de liste avec son score de criticité de 53 points avec la qualité des données qu'il fournit représentant le principal élément à surveiller.

Tableau 3.2 Résultats de l'évaluation du matériel clé du LIO

Liste des équipements	Taux de Rendement Général	Qualité	Coûts	Santé et sécurité	Impact environnemental	Total
Tapis Roulant AMTI	10	16	11	11	5	53
Système de caméra VICON	10	14	9	4	5	42
Système de capteurs inertIELS Xsens	7	12	8	4	6	37
Système d'électromyographie	6	12	6	4	6	34
Casque de réalité virtuelle	7	9	4	9	4	33

3.3.4 Maturité de maintenance du LIO

L'examen de la maturité des processus de maintenance a été réalisé sur le tapis roulant instrumenté AMTI du laboratoire, les résultats de la grille d'évaluation sont affichés dans le tableau 3.3. L'indice de maturité général a été arrondi à la décimale proche du résultat obtenu et s'élève donc à 2, ce qui correspond à l'état où les processus sont partiellement planifiés et leur gestion est faible en raison de lacunes dans le système organisationnel ou technique.

Tableau 3.3 Résultats de l'examen de la maturité des processus de maintenance sur le tapis roulant instrumenté AMTI

Grille d'évaluation de la maturité en maintenance							
Calcul des cotes							
Tapis roulant instrumenté AMTI							
	Essentiels				Excellence		
Questions	Gestion de base	Gestion des pièces et du matériel	Gestion de la performance	Systèmes IT—OT	Fiabilité des actifs	Processus Équipes	
1 ^{er}	1	3	2	1	1	2	
2 ^e	3		2			3	
3 ^e	3		1	1	1	2	
Indices de maturité	2	3	2	1	1	2	2

3.3.5 Amélioration des pratiques de maintenance du LIO

Une fois l'examen de la maturité complété, il est possible à partir des résultats de définir les processus de maintenance absents des pratiques du laboratoire et d'élaborer une feuille de route d'actions évolutives afin de porter la maturité à un niveau plus élevé. Les pistes d'amélioration

de la maturité des activités de maintenance réalisées sur le tapis roulant du laboratoire sont présentées dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 Actions amélioratives des pratiques de maintenance au LIO

Pistes d'amélioration de la maturité des activités de maintenance du tapis roulant instrumenté AMTI					
Gestion de base	Essentiels			Excellence	
	Gestion des pièces et du matériel	Gestion de la performance	Systèmes IT-OT	Fiabilités des actifs	Processus d'équipe
Développer un programme de maintenance préventive selon méthodes traditionnelles.		Poursuivre le programme d'amélioration.	Utiliser un système de gestion GMAO, même de façon rudimentaire.	Déclencher un programme d'amélioration de la fiabilité.	Réviser les processus et réduire les contournements.
Respecter complètement les inspections réglementaires.	Rendre les ruptures de stock rares.	Implanter un programme de gestion du cycle de vie des actifs.	Démarrer l'intégration des systèmes de monitoring des équipements.	Effectuer des analyses d'arrêts et implanter les améliorations.	Mettre en place des standards de maintenance cohérents.
Planification et utilisation à long terme des standards et des plans de travail.		Garantir la surveillance des indicateurs de performance.			Superviser les équipes et introduire la maintenance par secteur ou unité d'affaires.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

4.1 Modèle d'affaires

La trousse d'intervention pour la prise en charge de la maintenance proposée dans ce document vient en réponse aux questions de recherche énoncées dans l'introduction, elle s'adresse aux organisations disposant d'un parc de matériels pour la réalisation de leurs activités et dont les connaissances sont faibles en maintenance.

La première étape de la méthodologie évolutive adoptée aligne les besoins réels des organisations sur leurs ressources clés grâce à la maîtrise des contextes interne et externe recommandée par la norme ISO 55000. Cette étape conduit à la définition du portefeuille d'actifs clés à travers un modèle d'affaires réduit de quatre blocs (segment de clientèle, proposition de valeur, activités clés et ressources clés), adapté du modèle d'Osterwalder et Pigneur (2011) comptant neuf blocs. Le modèle n'étant constitué que de quatre blocs présente quelques limitations que devront dépasser les futurs travaux, mais offre une vision claire des différentes connexions existant depuis les segments de clientèle aux ressources clés.

Le choix d'un modèle d'affaire pour satisfaire à l'exigence 2.5.3.2 d'ISO 55000 fait partie de la dynamique du changement de paradigme dans les habitudes de la maintenance annoncée dans ce mémoire. En général, les professionnels de la maintenance ne sont pas impliqués dans les stratégies marketing et managériales de la direction des organisations, tandis que ces derniers disposent d'atouts pertinents dont les bénéfices pourraient être considérables. La gestion de la maintenance est aujourd'hui fortement reconnue comme une activité multidisciplinaire comptant plusieurs concepts qui proviennent de divers domaines. Il est donc de la responsabilité de la communauté universitaire d'innover, mais tout en restant dans un cadre à la portée des organisations. L'ensemble des modèles présentés par ce travail s'inscrivent dans ce registre.

4.2 Modèle de criticité

Le modèle d'évaluation de la criticité exposé dans la deuxième étape de la trousse d'intervention s'appuie sur le vote d'experts ayant le plus de connaissances sur les équipements pour définir le niveau et le domaine de criticité de chaque équipement en utilisant un questionnaire. Cette méthode est appropriée en absence de données réelles, de retour d'expérience ou d'indicateurs de performance puisque les entreprises de faible maturité dans la pratique de la maintenance n'effectuent aucune mesure des performances du parc machine. De nombreux auteurs dans la littérature ont également utilisé cette méthode pour déterminer les goulets d'étranglement dans les lignes de production. Pascal et al. (2016) ont utilisé une technique similaire pour attirer l'attention des décideurs sur les équipements ayant un impact important dans la conduite des opérations d'une compagnie minière. Tous les éléments précédents ont nourri le choix d'utilisation de cette méthode pour caractériser et estimer la criticité des équipements du parc machine.

La criticité dans cette trousse d'intervention est évaluée sur cinq paramètres, contrairement à Pascal et al. (2016) qui ont considéré trois paramètres, dont un facteur d'influence. La définition de cinq paramètres pour caractériser la criticité est importante pour adresser un grand public et couvrir la majorité des enjeux courants.

4.3 Modèle de maturité

La définition d'un classement des pratiques de maintenance est un problème connu, mais toujours ouvert, le concept de la maturité a été introduit à cette fin pour évaluer différentes pratiques de gestion de la maintenance de manière quantitative ou semi-quantitative. L'évaluation de la maturité est développée pour analyser différents objectifs ou groupes de processus, la pyramide d'excellence établie dans ce document regroupe les pratiques de maintenance minimalement requises pour qu'une organisation considère sa maintenance bien gérée. Le modèle d'évaluation de la maturité proposé dans ce mémoire ainsi que ceux présents dans la littérature se basent tous sur le capability maturity model integration (CMMI) pour définir et structurer un ensemble de bonnes pratiques. Ainsi, les différents résultats issus de l'application de ces modèles dans les organisations permettent de comparer ces derniers autour

des benchmarks. De par sa simplicité et des groupes de processus de maintenance qu'elle comporte, la pyramide d'excellence présentée dans ce mémoire est adaptée aux organisations de faible maturité dont le savoir des pratiques de maintenance est limité ou inexistant.

L'utilisation de quatre niveaux sur une échelle nominale a été retenue pour chacun des modèles de criticité et de maturité en raison du type d'organisation éligible à l'exploitation de la trousse d'intervention. Plusieurs modèles dans la littérature proposent cinq niveaux sur leurs échelles nominales, mais il est question ici de cultiver et d'encourager la mise en place des pratiques de maintenance au sein d'organisations où ces pratiques sont mal gérées ou inexistantes. Ainsi, la définition de quatre niveaux réduit le temps et les ressources pour observer les avantages prévus.

Le questionnaire d'évaluation utilisé pour collecter les données auprès des opérateurs qualifiés a été établi dans un lexique à la portée de la population ciblée et des informations ont été également ajoutées afin d'améliorer la compréhension des interviewers sur les termes et concepts de maintenance énoncés dans les modèles.

Les modèles mathématiques utilisés dans la trousse d'intervention pour calculer les poids de criticité et les indices de maturité sont composés d'opérations de somme et de moyenne. Certains auteurs dans la littérature ont introduit des pondérations dans le calcul de leurs indices pour souligner l'importance de certains éléments par rapport à d'autres. Les modèles proposant des facteurs d'influences dans la littérature sont personnalisés pour des organisations cibles et l'historique des leurs activités est également utilisée pour relever ces facteurs d'influences. La nature des organisations éligibles à l'exploitation de la trousse d'intervention présentée dans ce mémoire ne permet pas de disposer des données pouvant servir à définir des facteurs d'influence surtout durant une première utilisation. Ce qui justifie l'absence de pondération dans les modèles mathématiques élaborés dans ce document, mais l'ajout de facteurs d'influences serait envisageable dans les futures recherches.

4.4 Étude de cas du LIO

L’application du prototype de la trousse d’intervention développé sous l’interface Microsoft Excel a permis l’identification de cinq matériels clés dans le laboratoire de biomécanique du LIO et le tapis roulant instrumenté AMTI se trouve être l’équipement de criticité majeure. Les actions évolutives retenues après l’évaluation de la maturité augmentent la connaissance de la direction du LIO sur les besoins en maintenance de cet équipement, mais il demeure indispensable de mettre en œuvre ces actions afin d’observer les bénéfices attendus.

Le laboratoire de recherche du LIO dispose d’un système de gestion de la qualité et respecte les exigences de la norme ISO 13485, les résultats du dernier audit externe du système ont conclu la nécessité de tenir des activités de gestion de la maintenance. Dans le cas d’adoption d’un système pour gérer la maintenance au LIO, ce dernier doit être intégré au système qualité qui présente déjà plusieurs éléments utiles. Par exemple, le modèle d’inventaire du système de gestion de la qualité peut être étendu et non remplacé afin d’éviter les redondances et les pertes de ressources. Les modèles de criticité et de maturité devront être développés dans l’interface du système de gestion de la qualité. D’autres possibilités, comme l’ajout de certains paramètres dans les procédures et les enregistrements du système de la qualité du LIO sont envisageables pour mesurer des performances machines.

CONCLUSION

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire est parti du besoin général des entreprises d'être soutenu lors de l'identification des leviers pour améliorer leurs capacités existantes. La solution proposée à cet effet est une méthode d'évaluation de la maturité de maintenance. Celle-ci s'est appuyé sur une pyramide d'excellence de processus et a ensuite été mise en œuvre en tant que procédure composée de trois étapes, dont les objectifs sont d'aligner le portefeuille d'actifs avec les besoins réels, de caractériser et d'estimer la criticité des équipements du parc machine afin de mieux conduire les décisions d'investissement nécessaire à l'amélioration des pratiques de maintenance. L'approche est maintenant disponible à travers une interface accessible au grand public et représente un outil clé en main pour gérer les pratiques de maintenance dans une entreprise.

L'approche répond à deux questions de recherches, la première question « comment les stratégies de maintenance sont-elles alignées sur les besoins réels des entreprises ? » a également été abordée par d'autres approches dans la littérature. Néanmoins, il convient de mentionner que la valeur scientifique ajoutée par ce mémoire est la structuration des différentes connexions depuis la clientèle d'une entreprise à son parc machine basée sur le respect de certaines exigences de la norme ISO 55000 en gestion d'actifs. La deuxième question « comment les gestionnaires d'entreprise peuvent-ils améliorer efficacement leur maturité avec les moyens et ressources à leurs dispositions ? » a plutôt conduit à un concept novateur : utiliser le potentiel d'une démarche évolutive depuis la maintenance des équipements critiques vers un déploiement plus simple sur les équipements moins critiques. L'évaluation de la maturité présentée a mis en évidence les tâches à réaliser afin de porter les entreprises vers une gestion productive des actifs.

Il faut noter que des approches structurées d'évaluation de la maturité des processus de maintenance (voir Schumacher et al., 2016) présentent des similitudes par rapport à la méthodologie proposée dans le présent mémoire. Néanmoins, personne n'a exploité les exigences de la norme ISO 55000 et mené un changement de paradigme dans le domaine de la

maintenance afin de mieux adresser les besoins réels des organisations pour optimiser la mobilisation des ressources disponibles.

L'approche de gestion de la maintenance élaborée à travers la trousse d'intervention a été appliquée au laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie de l'école de technologie supérieure de Montréal. La comparaison pré et post application de l'état du laboratoire démontre une meilleure connaissance de la direction du LIO sur les actions prioritaires à mettre en œuvre pour améliorer la maturité. Cette preuve de concept fournit des indications prometteuses pour les futurs travaux dont l'objectif principal serait la mise en place des actions d'amélioration de la maturité et le suivi à long terme du système.

RECOMMANDATIONS

Le présent document est un mémoire de type recherche et développement, une méthodologie a donc été adoptée en vue de solutionner une problématique et une étude de cas a été effectuée pour fournir une preuve du concept. Cette section met l'accent sur les éléments qui réduisent la qualité de ce travail en termes de son élaboration et de sa mise en œuvre pratique et qui pourraient être abordés dans les recherches ultérieures.

Tout d'abord, la première étape de l'approche de gestion de la maintenance présentée dans cette trousse d'intervention vise à aligner le portefeuille d'actifs avec les besoins réels de l'organisation afin de mieux satisfaire les segments de clientèle. Mais un modèle d'affaire comportant uniquement quatre blocs a été utilisé, ce qui limite la portée de l'action puisque les données relatives aux partenaires clés, aux sources de revenus, aux coûts, etc. n'ont pas été considérées. Afin de rendre la première étape de la trousse d'intervention plus complète et de bénéficier de tous ses avantages, il faudra intégrer tous les neuf blocs du modèle d'affaires proposé par Osterwalder et Pigneur (2011) dans le modèle actuel.

Ensuite, le modèle d'évaluation de la maturité élaboré dans la troisième partie de la trousse d'intervention permet d'améliorer la maturité en maintenance sur la base de processus définie dans la pyramide d'excellence. En ajoutant plus de processus de maintenance dans la pyramide d'excellence, le modèle pourrait porter la gestion de la maintenance des organisations à un niveau de maturité de classe mondiale. L'introduction de pondération sur les groupes de processus selon leurs importances pour une organisation en particulier serait un progrès notable dans le calcul des indices de maturité du modèle proposé dans la trousse d'intervention.

Enfin, la preuve de concept démontrée par l'application de la trousse d'intervention dans le laboratoire du LIO a permis de vérifier son efficacité. Mais cette opération serait plus pertinente si l'on observe l'utilisation de la trousse d'intervention durant une longue période.

ANNEXE I

STRUCTURE D'UN SYSTÈME DE GESTION D'ACTIFS PHYSIQUES À TRAVERS ISO 55000

Les éléments d'un système de gestion d'actifs représentent des outils incluant des politiques, des plans, des processus et des systèmes d'informations, qui sont intégrés pour la réalisation des activités de gestion d'actifs. Le développement d'un système de gestion d'actifs physiques est une décision stratégique importante pour une organisation. L'ISO 55001 spécifie les exigences d'un système de gestion d'actifs et l'ISO 55002 fournit les lignes directrices relatives à sa conception et à son exploitation. Les exigences relatives au système de gestion d'actifs ont été organisées en sept éléments spécifiques.

Contexte de l'organisation

Lors de la mise en place ou de la revue de son système de gestion d'actifs, l'organisation prend en compte son contexte interne et externe pour déterminer les questions pertinentes à son objectif et qui affectent sa capacité à atteindre les résultats prévus. Le contexte externe comprend les environnements social, culturel, économique et physique, de même que les contraintes réglementaires et financières. Le contexte interne quant à lui comprend la mission, la vision et les valeurs de l'organisation, ainsi que les requêtes, les préoccupations et les attentes de la direction. Ensuite, l'organisation définit les limites et l'applicabilité de son système de gestion d'actifs physiques pour établir son champ d'action. La portée du système s'aligne ainsi donc sur les objectifs et la politique de gestion d'actifs et doit être disponible en tant qu'information documentée. L'organisation doit également définir le portefeuille d'actifs couvert par le périmètre du système de gestion d'actifs. Enfin, l'organisation implante, maintient et améliore continuellement le système de gestion d'actifs physiques y compris les processus nécessaires et leurs interactions conformément aux exigences de l'ISO 55001. Un plan stratégique de gestion d'actifs incluant la documentation du rôle du système de gestion d'actifs sera à l'appui de la réalisation des objectifs de la gestion d'actifs.

Leadership

Le leadership est un facteur important dans la gestion efficace des actifs. La gestion d'actifs doit être représentée à un niveau suffisamment élevé dans l'organisation, un leadership adéquat dans la gestion d'actifs doit être atteint. Sans quoi, les plans d'affaires peuvent échoués en raison de la fourniture inadéquate d'actifs et un soutien inapproprié. Le leadership définit et priorise le développement de la capacité de la gestion d'actifs pour l'atteinte des objectifs globaux de l'organisation. Pour comprendre le leadership de la gestion d'actifs physiques, il faut tout d'abord comprendre la différence entre une bonne gestion et un leadership efficace. Le bon gestionnaire planifie, organise, contrôle et s'assure que les activités soient effectuées. Le leader définit les directions, challenge le surplace, innove et dirige, développe et implémente des systèmes et procédures améliorés. Le leadership de la gestion d'actifs physiques est la combinaison d'une bonne gestion et d'un leadership efficaces. Le leadership en gestion d'actifs physiques nécessite que la direction démontre un engagement et un respect vis à vis du système de gestion d'actifs. La direction doit donc :

- S'assurer de la compatibilité des objectifs et de la politique de gestion d'actifs avec les objectifs de l'organisation;
- S'assurer de l'intégration des exigences du système de gestion d'actifs dans les procédures de l'organisation;
- S'assurer que le système de gestion d'actifs physiques accomplit les résultats attendus (Platfoot, 2014).

Planification

Les objectifs de l'organisation déterminent son contexte global et l'orientation de ses activités, de même que les activités de gestion d'actifs. Ces objectifs sont produits à partir des activités de planification de l'organisation et sont documentés dans le plan de l'organisation.

Les principes selon lesquels l'organisation compte appliquer la gestion doivent être énoncés dans la politique de gestion d'actifs. L'approche de mise en œuvre sera donc documentée dans le plan stratégique de gestion d'actifs (PSGA).

Le PSGA sert de guide dans la formulation des objectifs de la gestion d'actifs et la description du rôle du système de gestion d'actifs. Il inclut les structures, les rôles et les responsabilités pour la mise en place du système de gestion d'actifs. Lorsque le système de gestion d'actifs considère les durées de vie complètes des actifs, le calendrier du PSGA peut s'étendre au-delà de celui des activités de l'organisation. L'organisation utilise son PSGA pour conduire son système de gestion d'actifs physique dans l'élaboration de ces plans stratégiques pour la gestion d'actifs. Ces plans doivent définir eux-mêmes les activités à entreprendre sur les actifs et disposer d'objectifs spécifiques et mesurables.

Support

Le système de gestion des actifs nécessite la collaboration de nombreuses parties de l'organisation, ce qui implique le partage des ressources. La coordination de ces ressources, l'application, la vérification et l'amélioration de leurs utilisations constituent des objectifs du système de gestion des actifs. Le système promeut la sensibilisation aux objectifs de gestion des actifs dans l'ensemble de l'organisation. Le système de gestion d'actifs spécifie les compétences du personnel impliqué dans la gestion d'actifs. La mise en œuvre, la maintenance, l'évaluation et l'amélioration de ces compétences exigent une coopération étroite avec les ressources humaines de l'organisation. Les différents acteurs de l'organisation doivent prendre connaissance de leurs impacts sur la réalisation des objectifs du système de gestion d'actifs. Ils doivent également être conscients de la politique de gestion d'actifs, leur contribution à l'efficacité du système et les avantages de l'amélioration des performances de gestion des actifs.

Fonctionnement

Le système de gestion des actifs de l'organisation permet l'orientation, la mise en œuvre et le contrôle de ses activités de gestion d'actifs. Les politiques de fonctionnements, les normes techniques, les plans et les processus de mise en œuvre des plans de gestion des actifs sont inclus dans la conception et l'exploitation du système de gestion des actifs.

L'organisation planifie, met en œuvre et contrôle les processus nécessaires pour répondre aux exigences, traiter les risques et les opportunités pour le système de gestion des actifs, déterminer le plan de gestion des actifs et déterminer les actions correctives et préventives.

Le fonctionnement du système de gestion des actifs peut parfois nécessiter des modifications planifiées des processus ou procédures de la gestion des actifs, susceptible d'introduire de nouveaux risques. Ainsi les risques associés à tout changement planifié, permanent ou temporaire, pouvant avoir une incidence sur la réalisation des objectifs de la gestion des actifs doivent être évalués avant la mise en œuvre du changement (ISO, 2014a). Lorsqu'une organisation sous-traite toute activité pouvant avoir un impact sur la réalisation des objectifs de gestion d'actifs, elle évalue les risques associés et s'assure que les processus externalisés et les activités sont contrôlés. L'organisation détermine et documente comment ces activités seront contrôlées et intégrées dans le système de gestion des actifs.

Évaluation des performances

L'organisation évalue la performance de ses actifs, de sa gestion d'actifs et de son système de gestion d'actifs. Les mesures de performances peuvent être directes ou indirectes, financières ou non financières. L'évaluation de la performance des actifs est souvent indirecte et complexe. La gestion efficace des données relatives aux actifs et la transformation de ces données en informations sont la clé de la mesure des performances des actifs. Le suivi, l'analyse et l'évaluation de ces informations constituent un processus continu. L'organisation évalue les performances de la gestion d'actifs en déterminant si les objectifs ont été atteints et si ce n'est pas le cas, les raisons de cet échec. Le cas échéant, il faut explorer toutes les opportunités d'un dépassement des objectifs de la gestion d'actifs. La performance du système de gestion des actifs est évaluée par rapport aux objectifs fixés spécifiquement pour le système lui-même. Le principal objectif de l'évaluation du système est de déterminer s'il contribue de manière efficace et efficiente à la gestion des actifs de l'organisation. Des audits périodiques sont utilisés pour évaluer la performance du système de gestion des actifs et ils peuvent être complétés par des auto-évaluations.

La direction examine le système de gestion des actifs de l'organisation, à intervalles réguliers, pour s'assurer de sa pertinence, son adéquation et son efficacité. La revue de la direction inclut

l'examen des résultats ainsi que les décisions relatives à l'amélioration continue des opportunités ou tout besoin de modifications. L'organisation conserve les informations documentées comme preuve de résultats des revues de la direction.

Amélioration

Le système de gestion des actifs d'une organisation est susceptible d'être complexe et en constante évolution pour s'adapter à son contexte, aux objectifs organisationnels et à son portefeuille d'actifs. L'amélioration continue est un concept applicable aux actifs, aux activités de gestion d'actifs et au système de gestion d'actifs. Les opportunités d'amélioration peuvent être déterminées directement en surveillant la performance du système de gestion des actifs et la performance des actifs. Les non-conformités ou les non-conformités potentielles du système de gestion des actifs sont identifiées par des revues de la direction et des audits internes ou externes. Les non-conformités nécessitent des mesures correctives et les non-conformités potentielles nécessitent des actions préventives. Les incidents, évènements imprévus et situations d'urgences liés aux actifs sont étudiés et font l'objet d'une revue afin de déterminer les actions nécessaires pour prévenir leur apparition et limiter leurs effets. Les actions préventives et correctives doivent être adaptées aux effets des non-conformités ou des incidents rencontrés. L'organisation établit des processus pour identifier de manière proactive les défaillances potentielles dans la performance des actifs et évaluer la nécessité d'une action préventive. L'organisation doit continuellement améliorer la pertinence, l'adéquation et l'efficacité de sa gestion d'actifs et de son système de gestion d'actifs.

ANNEXE II

MODÈLE D'AFFAIRES

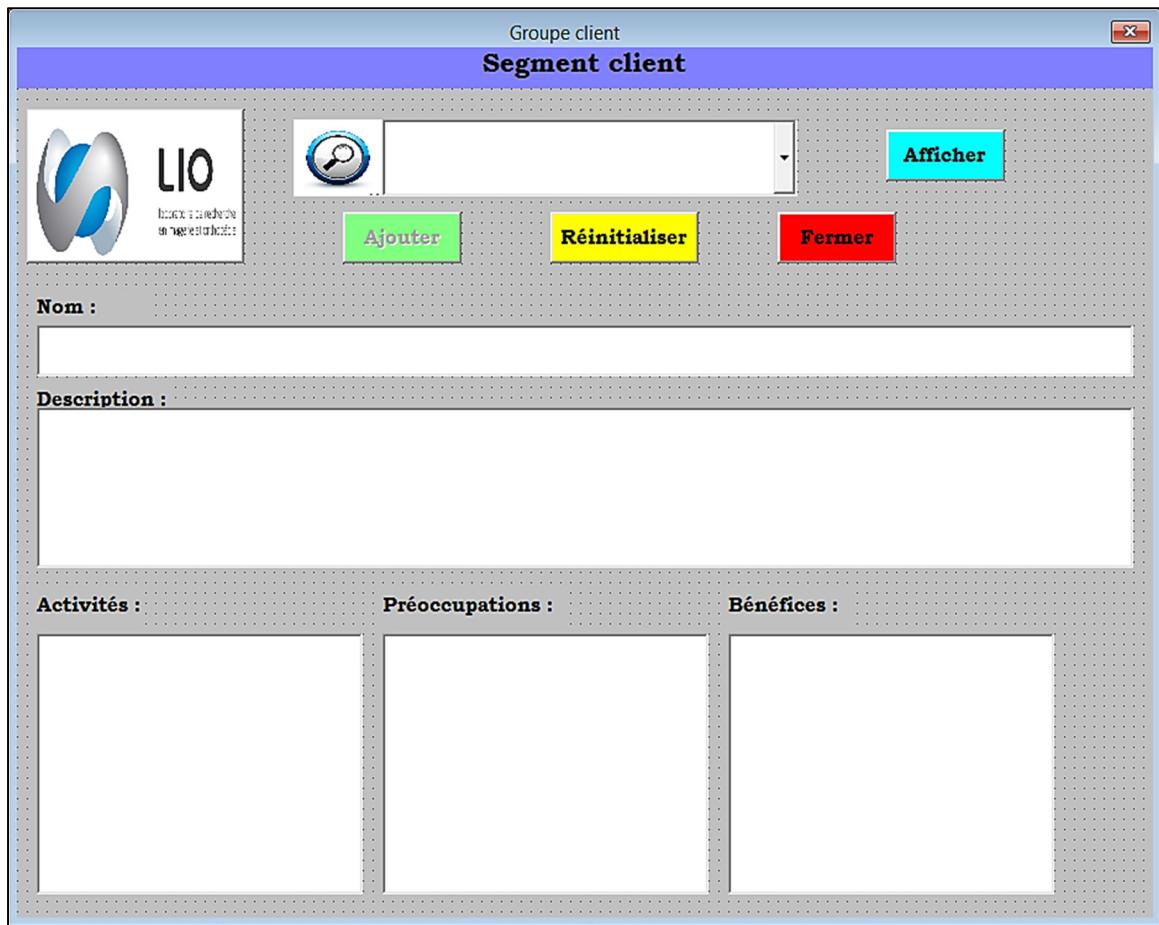


Figure A II-1 Carte du profil client

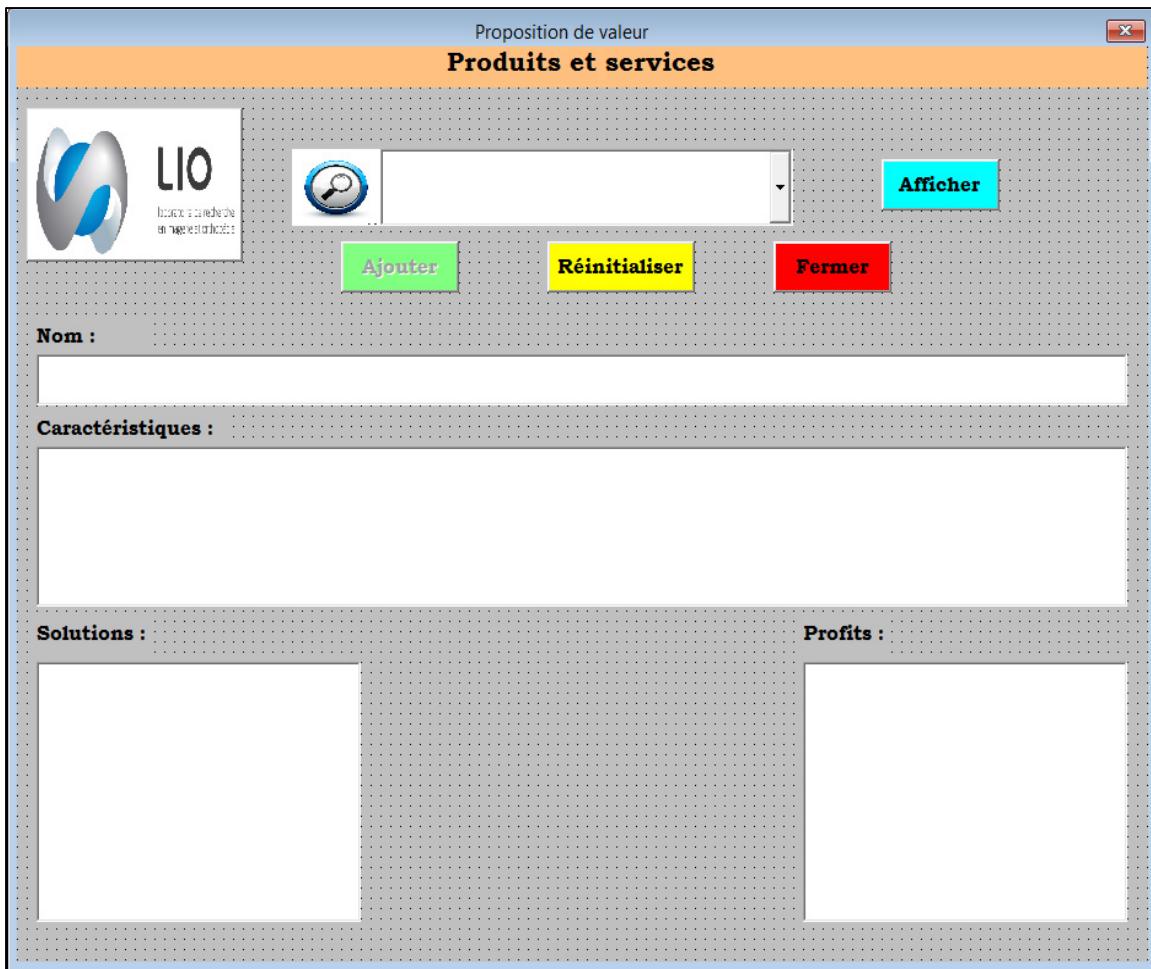


Figure A II-2 Carte de la proposition de valeur

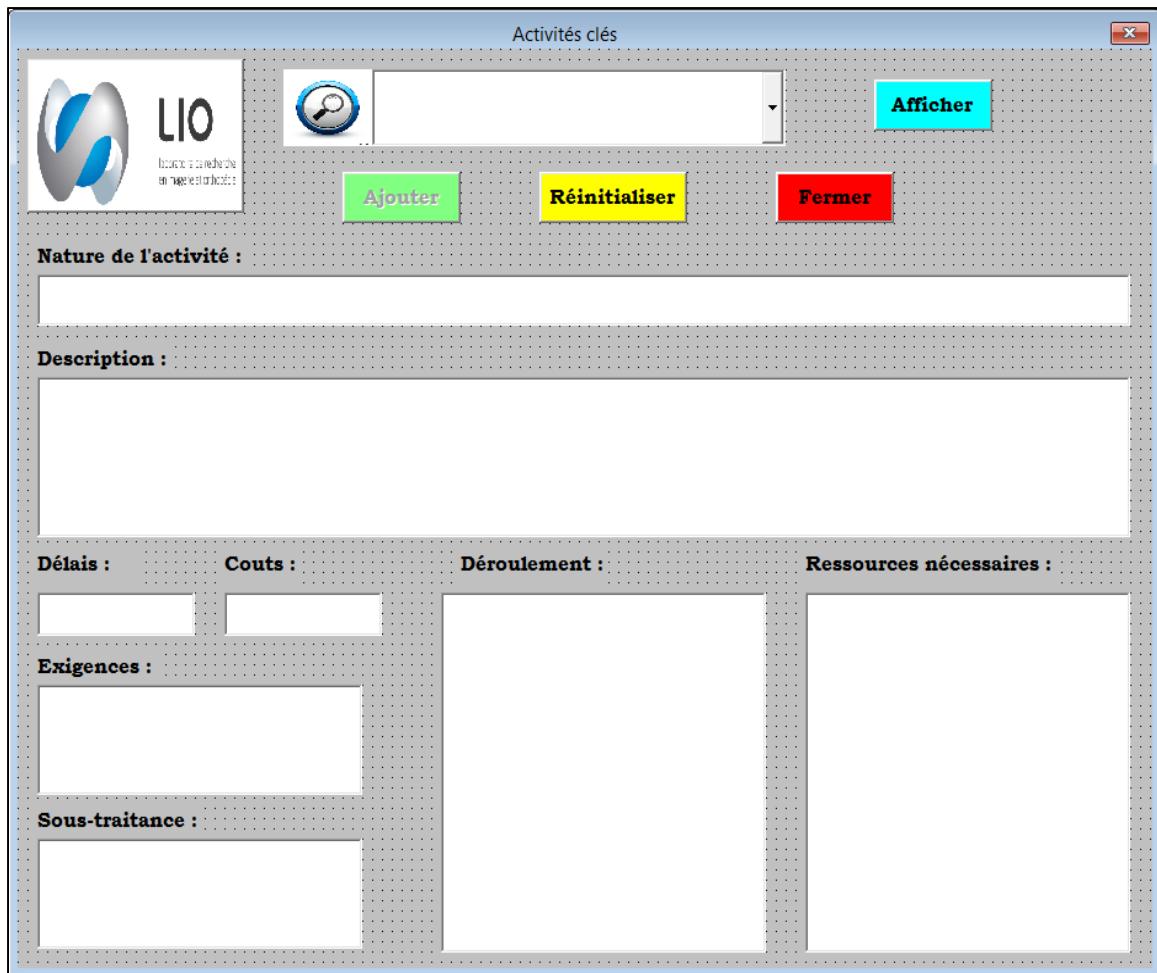


Figure A II-3 Activités clés

Ressources clés

The screenshot shows a software window titled "Ressources clés". At the top left is a logo with the letters "LIO" and the text "Inventaire et suivi des ressources". To the right are buttons for "Afficher" (cyan), "Réinitialiser" (yellow), and "Fermer" (red). Below these are sections for "Identification de l'équipement" (Identification of equipment) with fields for "#-d'identification", "Type", "Quantité", "Dimensions", and "Localisation". There are also sections for "Désignation" (Designation), "Description", and "Remarque" (Remark). The next section, "Informations Fabricant" (Manufacturer information), contains fields for "Nom du fabricant", "#-de série", "Modèle", "Correspondance", and "Normalisation". The final section, "Informations équipement" (Equipment information), includes fields for "Date d'acquisition", "Date de mise en service", "Durée de vie", "Garantie", "Prix d'achat", "Valeur actuelle", and "Etat". On the far right of this section is a button labeled "Ouvrir" (Open). A small "Documents de l'équipement" (Equipment documents) label is positioned above the "Ouvrir" button.

Figure A II-4 Modèle d'inventaire

ANNEXE III

CARTE DE POINTAGE POUR L'ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ

Tableau A IIII-1 Récapitulatif du questionnaire de pointage

Catégories	Affirmations	Informations
Rendement	a — L'indisponibilité de cet équipement provoque l'arrêt total des services ou opérations de l'organisation.	Il s'agit de l'incapacité de l'équipement à être en état d'accomplir sa fonction requise dans des conditions données, à un instant donné en supposant que la fourniture des moyens extérieurs soit assurée.
	b— L'équipement possède le plus grand taux d'engagement et d'exploitation du parc d'équipement.	Le taux d'engagement et d'exploitation d'un équipement traduit la quantité de produits ou de services générés par l'utilisation de cet équipement.
	c- L'équipement est incapable d'effectuer sa fonction requise en cas de défaillances partielles.	Lorsqu'un module ou une unité de l'équipement est défaillant, l'arrêt partiel des services ne peut être toléré pour sa réparation, ou sa remise en service ne peut être retardée.
	d- En cas de dysfonctionnement de l'équipement, ce dernier ne peut être substitué ou remplacé par un autre.	La redondance du matériel consiste à disposer de plusieurs exemplaires d'un même équipement pour augmenter la capacité totale ou les performances d'un système et pour réduire le risque d'arrêt.

Tableau A III-1 Récapitulatif du questionnaire de pointage (suite)

Catégories	Affirmations	Informations
Qualité	a — L'excellence des résultats de performance de cet équipement est cruciale.	Le résultat de performance est un outil utilisé pour suivre l'évolution de la qualité des produits ou services. Dépendamment du type d'entreprise, il peut être représenté par la mesure de taux de rebut.
	b— L'exactitude des produits issus du fonctionnement de cet équipement est capitale.	La conformité de produits aux normes et aux réglementations est un facteur clé du succès des entreprises. Il s'agit d'un élément incontournable dont il faut tenir compte en ce qui concerne l'élaboration de nouveaux produits.
	c- La qualité des services que fournit cet équipement est indispensable à la satisfaction des segments de clientèle.	La qualité d'un produit couvre sa performance, mais aussi sa disponibilité. Elle est devenue un argument essentiel pour les entreprises parce qu'elle représente un critère essentiel de choix pour les clients.
	d- La fiabilité de cet équipement est essentielle au bon déroulement des opérations.	La fiabilité d'un matériel traduit son aptitude à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée.

Tableau A III-1 récapitulatif du questionnaire de pointage (suite)

Catégories	Affirmations	Informations
Coûts	a — Les dépenses engendrées par l'exploitation de cet équipement sont colossales.	Les coûts d'exploitation peuvent être décrits comme les frais associés à l'exploitation d'un matériel, d'un composant ou d'une pièce d'équipement.
	b— Le remplacement de cet équipement coûterait très cher.	La valeur de remplacement indique le montant d'argent qu'il faudrait défrayer au moment présent pour remplacer un actif.
	c- Les coûts relatifs aux activités de maintenance de cet équipement sont énormes.	Le coût de maintenance d'un équipement prend en compte toutes les dépenses engendrées par la pratique de la maintenance sur cet équipement.
	d- Le montant d'acquisition de cet équipement est onéreux.	Le coût d'achat d'un équipement correspond au prix d'achat complet, majoré des frais de transport, d'installation, de déménagement ou de mise en service.

Tableau A III-1 récapitulatif du questionnaire de pointage (suite)

Catégories	Affirmations	Informations
Santé et sécurité	a — L'utilisation de cet équipement représente un danger pour la santé humaine.	Il est de la responsabilité de la direction de relever tous les dangers potentiels dus à l'utilisation de ces actifs.
	b— L'utilisateur ou les personnes présentent dans l'entourage de cet équipement sont exposé à des risques.	Il est de la responsabilité de la direction de relever tous les dangers potentiels dus à l'utilisation de ces actifs.
	c- La sécurité des personnes en contact avec cet équipement est capitale.	L'organisation doit garantir la santé et la sécurité de toute personne interagissant avec le matériel potentiellement dangereux.
	d- L'exploitation de cet équipement provoque un risque élevé pour la santé.	L'organisation doit garantir la santé et la sécurité de toute personne interagissant avec le matériel potentiellement dangereux.

Tableau A III-1 récapitulatif du questionnaire de pointage (fin)

Catégories	Affirmations	Informations
Impact environnemental	a — L'usage de cet équipement entraîne des répercussions biophysiques et sociales.	L'impact environnemental qualifier les préjudices portés à l'environnement, ces impacts affectent principalement la qualité de l'air, la qualité de l'eau, les ressources et la santé humaine.
	b— Les éléments entrants ou sortants de cet équipement sont nocifs à l'environnement.	L'impact environnemental qualifier les préjudices portés à l'environnement, ces impacts affectent principalement la qualité de l'air, la qualité de l'eau, les ressources et la santé humaine.
	c- L'exploitation de cet équipement représente un risque pour l'environnement.	L'impact environnemental qualifier les préjudices portés à l'environnement, ces impacts affectent principalement la qualité de l'air, la qualité de l'eau, les ressources et la santé humaine.
	d- De par sa constitution, le poids environnemental de cet équipement est élevé.	L'impact environnemental qualifier les préjudices portés à l'environnement, ces impacts affectent principalement la qualité de l'air, la qualité de l'eau, les ressources et la santé humaine.

ANNEXE IV

QUESTIONNAIRE D'ÉVALUATION DE LA MATURITÉ

Tableau A IVV-1 Récapitulatif du questionnaire d'évaluation de la maturité

Groupes de processus	Questions	Niveau de maturité 1	Niveau de maturité 2	Niveau de maturité 3	Niveau de maturité 4
Gestion de base	Qu'est-ce que la direction a fait pour mettre en place un programme de Maintenance Préventive (MP) ?	Programme de maintenance préventive de base ou inexistant.	Développement d'un programme de MP en cours selon méthodes traditionnelles.	Programme de MP principalement systématique.	Programme de MP intégrant la maintenance conditionnelle.
	Est-ce que la direction effectue les inspections réglementaires ?	Non-respect des inspections réglementaires.	Faible respect des inspections réglementaires.	Respect partiel des inspections réglementaires.	Respect complet des inspections réglementaires.
	Existe-t-il une planification et un ordonnancement des activités en conformité avec le calendrier de maintenance ?	Pas de planification, peu d'ordonnancement et faible conformité au calendrier de maintenance.	Planification pour quelques travaux et arrêts majeurs au fur et à mesure que les demandes apparaissent.	Processus de planification et d'ordonnancement en place pour la plupart des travaux.	Planification à long terme Utilisation de standards et de plans de travail.

Tableau A IVV-1 Récapitulatif du questionnaire d'évaluation de la maturité (suite)

Groupes de processus	Questions	Niveau de maturité 1	Niveau de maturité 2	Niveau de maturité 3	Niveau de maturité 4
Gestion des pièces et du matériel	Quel est l'état de l'organisation en matière de gestion des pièces et matériels ?	Ruptures de stock fréquentes Faible niveau de service Travaux interrompus par manque de pièces.	Quelques interruptions des travaux par manque de pièces.	Ruptures de stock rares. Analyses de la performance de l'inventaire réalisées et plans d'amélioration de l'inventaire en cours.	Ruptures de stock rares et analyses de la performance de l'inventaire réalisées avec des plans d'amélioration.
Gestion de la performance	Est-ce que la direction a mis en place un programme d'amélioration de la maintenance ?	Aucun programme d'amélioration.	Programme d'amélioration nouvellement en place.	Suivi du programme d'amélioration, les tendances démontrent un début d'amélioration.	Programme d'amélioration continue pleinement en place, l'analyse des tendances démontre une nette amélioration.

Tableau A IVV-1 Récapitulatif du questionnaire d'évaluation de la maturité (suite)

Groupes de processus	Questions	Niveau de maturité 1	Niveau de maturité 2	Niveau de maturité 3	Niveau de maturité 4
Gestion de la performance	Est-ce que la direction a mis en place un programme de suivis des équipements ?	Aucun suivi des équipements.	Enregistrement des évènements relatifs aux équipements.	Programme de gestion du cycle de vie des actifs nouvellement implanté.	Programme de gestion du cycle de vie des actifs en place.
	Est-ce que la direction a mis en place des indicateurs de performance ?	Aucun indicateur de performance.	Quelques données de pannes sont documentées.	Indicateurs de performance de base sont suivis.	Tableau de bord des indicateurs de performance complet.
Systèmes IT-OT	Est-ce que la direction utilise des technologies d'information ?	Peu ou pas d'utilisation d'un système de gestion GMAO.	Utilisation rudimentaire du système de gestion GMAO sans réelle valeur ajoutée.	Utilisation intensive du système de gestion GMAO pour le management.	Utilisation du système de gestion GMAO avec bonne appropriation.
	Est-ce que la direction utilise des technologies opérationnelles ?	Aucune utilisation de technologie opérationnelle ou utilisation potentielle de systèmes ad hoc.	Intégration des systèmes de monitoring des équipements considéré.	Rapports utilisés et quelques systèmes de monitoring des équipements en place.	Monitoring des équipements, et systèmes d'aide à la décision en place.

Tableau A IVV-1 Récapitulatif du questionnaire d'évaluation de la maturité (suite)

Groupes de processus	Questions	Niveau de maturité 1	Niveau de maturité 2	Niveau de maturité 3	Niveau de maturité 4
Fiabilité des actifs	Qu'est-ce que la direction a fait pour garantir la disponibilité des équipements ?	Aucune analyse des causes, aucune tentative d'amélioration pour réduire les arrêts.	Analyses d'arrêts effectuées, quelques améliorations implantées.	Analyse des causes fondamentales de défaillances et quelques optimisations de la MP en place.	Causes fondamentales de défaillances utilisées, données de maintenance utilisées en conception.
	Qu'est-ce que la direction a fait pour garantir la fiabilité ?	Aucune action engagée pour garantir la fiabilité.	Programme d'amélioration de la fiabilité débuté.	Maintenance Basée sur la Fiabilité utilisée pour élaborer la MP.	Programme de MP complètement défini par la Maintenance Basée sur Fiabilité.
Processus d'équipe	Est-ce que la direction a documenté les processus de maintenance ?	Processus non documentés et inefficaces.	Processus documentés, mais jamais révisés.	Processus efficaces et efficientes, révisions régulières pour occasionnelles.	Processus efficaces et efficientes, révisions régulières pour les maintenir à jour.

Tableau A IVV-1 Récapitulatif du questionnaire d'évaluation de la maturité (fin)

Groupes de processus	Questions	Niveau de maturité 1	Niveau de maturité 2	Niveau de maturité 3	Niveau de maturité 4
Processus d'équipe	Est-ce que la direction a mis en place une standardisation des compétences, savoir-faire et des connaissances ?	Non-standardisation des façons de faire.	Standardisation envisagée.	Standards de maintenance par secteur.	Standards de maintenance cohérents en place.
	Qu'est-ce que la direction a fait pour mettre en place un système de gestion des équipes de maintenance ?	Aucune gestion des équipes de maintenance.	Mélange de ressources centralisées et assignées à des secteurs de la production.	Équipes supervisées production — maintenance par secteur ou unité d'affaires.	Équipes autonomes production — maintenance Support par management et spécialistes.

ANNEXE V

RÉSULTAT DE L'ÉVALUATION DE LA MATURITÉ DU TAPIS ROULANT INSTRUMENTÉ AMTI DU LIO

The screenshot shows a Microsoft Word document titled "Trousse d'intervention p". The ribbon tabs visible are Fichier, Accueil, Insertion, Mise en page, Formules, Données, Révision, Affichage, and Développ. The Accueil tab is selected. The toolbar includes options for Calibri font (size 11), bold, italic, underline, and various alignment and spacing tools. The main content is a table titled "Grille d'évaluation de la maturité en maintenance" (Maturity Evaluation Grid for Maintenance). The table has the following structure:

Grille d'évaluation de la maturité en maintenance								
Calcul des cotes								
Tapis roulant instrumenté AMTI								
4	Essentiels				Excellence			
5	Questions	Gestion de base	Gestion des pièces et du matériel	Gestion de la performance	Systèmes IT - OT	Fiabilité des actifs	Processus Équipes	Total
6	1	1		2	1	1	2	7
7	2	3	3	2			3	11
8	3	3		1	1	1	2	8
9	Indice de maturité	2,33333	3	1,66667	1	1	2,33333	1,8889
10								
11								
12								
13								
14								

Améliorer la maturité Réinitialiser

Figure A V-1 Résultats de l'évaluation de la maturité

Trousse d'intervention pour la gestion de la maintenance - Excel

Grille d'évaluation de la maturité en maintenance															
Pistes d'amélioration															
Tapis roulant instrumenté AMTI															
Essentiels									Excellence						
Gestion de base			Gestion des pièces et du matériel	Gestion de la performance			Systèmes IT - OT	Fiabilité des actifs		Processus Équipes					
Q1	Q2	Q3	Q1	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q3		
Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	1	
Développer un programme de MP en cours selon méthodes traditionnelles.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Suivre les indicateurs de performance de base.	Utiliser un système de gestion GMAD, même de façon rudimentaire.	Considérer une intégration des systèmes de monitoring des équipements.	Déclencher le programme d'amélioration de la fiabilité.	Effectuer des analyses d'arrêts et planifier les améliorations.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	2	
	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Aucune amélioration.	Suivre le programme de gestion du cycle de vie des actifs.	implanter un programme de gestion d'amélioration.				Réviser les processus et réduire les contournements.	Aucune amélioration.	Superviser les équipes et introduire la maintenance par secteur ou unité d'affaire.		3	
	Respecter complètement les inspections réglementaires	Planifier à long terme Utiliser des standards et des plans de travail.	Rendre les ruptures de stock rares.									Mettre en place des standards de maintenance cohérents.			4

Figure A V-2 Pistes d'amélioration de la maturité

BIBLIOGRAPHIE

- Amadi-Echendu, J. E., Brown, K., Willett, R., & Mathew, J. (2011). Definitions, Concepts and Scope of Engineering Asset Management. London: Springer-Verlag London. Repéré à <http://proxy.uqtr.ca/login.cgi?action=login&u=uqtr&db=springer-eb&url>.
- Attri, R., Grover, S., & Dev, N. (2014). A graph theoretic approach to evaluate the intensity of barriers in the implementation of total productive maintenance (TPM). *International Journal of Production Research*, 52 (10), 3032–3051.
- Au-Yong, C. P., Ali, A.-S., Ahmad, F., & Chua, S. J. L. (2017). Influences of key stakeholders' involvement in maintenance management. *Property Management*, 35 (2), 217–231.
- Azadivar, F., & Shu, V. (1999). Maintenance policy selection for JIT production systems. *International Journal of Production Research*, 37 (16), 3725–3738.
- Campbell, J. D., & Reyes-Picknell, J. V. (2015). Uptime: Strategies for excellence in maintenance management. CRC Press.
- Crespo Márquez, A., Moreu de León, P., Gómez Fernández, J., Parra Márquez, C., & López Campos, M. (2009). The maintenance management framework: A practical view to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15 (2), 167–178.
- Daragh Naughton, M., & Tiernan, P. (2012). Individualising maintenance management: a proposed framework and case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18 (3), 267–281.
- Feldman, D. S. (1995). Asset management. *The Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly*, 36 (5), 36–51.
- Fraser, K., Hvolby, H.-H., & Tseng, T.-L. (2015). 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*, 32 (6), 635–664.
- Frolov, V., Ma, L., Sun, Y., & Bandara, W. (2010). Identifying core functions of asset management. Dans Definitions, Concepts and Scope of Engineering Asset Management (pp. 19–30). Springer.
- Hameed, A., Khan, F., & Ahmed, S. (2016). A risk-based shutdown inspection and maintenance interval estimation considering human error. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 9–21.

- Haroun, A. E. (2015). Maintenance cost estimation: application of activity-based costing as a fair estimate method. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21 (3), 258–270.
- Hastings, N. A. J. (2010). Physical Asset Management. London: Springer London. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84882-751-6>.
- Hastings, N. A. J. (2015). Physical Asset Management: With an Introduction to ISO55000 (2nd ed. 2015. éd.). Cham: Springer International Publishing. Repéré à <http://proxy.uqtr.ca/login.cgi?action=login&u=uqtr&db=sciencedir&ezurl=http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-14777-2>.
- Henriques, I., & Sadorsky, P. (1999). The relationship between environmental commitment and managerial perceptions of stakeholder importance. *Academy of management Journal*, 42 (1), 87–99.
- Huggett, P. J. J. (2005). Asset Management—the changing role of Maintenance Management. In T. W. P. Ltd (Ed.), (pp. 1–2).
- Ilangkumaran, M., & Kumanan, S. (2009). Selection of maintenance policy for textile industry using hybrid multi-criteria decision making approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20 (7), 1009–1022.
- Institute, C. M. S. E. g. (2011). Capability Maturity Model Integration (CMMI-SM), Version 1.1.
- ISO. (2014). Gestion d'actifs : aperçu général, principes et terminologie (Première édition) Genève : ISO.
- Killick, M., & Thomas, G. (2008). Best practice maintenance planning. *Asset Management & Maintenance Journal*, 21 (4).
- Koskela, P., Paavola, M., Karjanlahti, J., & Leiviskä, K. (2011). Condition Monitoring of a Process Filter Applying Wireless Vibration Analysis. *Sensors & Transducers*, 128 (5), 17.
- Lankhorst, M. (2017). Enterprise Architecture at Work: Modelling, Communication and Analysis (4th ed. 2017. éd.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Repéré à <https://apps.uqo.ca/LoginSigparb/LoginPourRessources.aspx?url=http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53933-0>.
- Lee, J., Ni, J., Djurdjanovic, D., Qiu, H., & Liao, H. (2006). Intelligent prognostics tools and e-maintenance. *Computers in industry*, 57 (6), 476–489.

- Liu, Q., & Lv, W. (2015). Multi-component manufacturing system maintenance scheduling based on degradation information using genetic algorithm. *Industrial Management & Data Systems*, 115 (8), 1412–1434.
- Macchi, M., & Fumagalli, L. (2013). A maintenance maturity assessment method for the manufacturing industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19 (3), 295–315.
- Macchi, M., Fumagalli, L., Rosa, P., Farruku, K., & Gasparetti, M. (2011). Maintenance maturity assessment: a method and first empirical results in manufacturing industry. Dans Proceedings of MPMM 2011 Conference, Lulea (pp. 13-15).
- Management, I. o. A., 2015. Asset Management—an anatomy.
- Management, I. o. A., & Institution, B. S. (2010). Asset management. Part 2, Guidelines for the application of PAS 55-1. London, Royaume-Uni: British Standards Institution.
- Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2011). Business model nouvelle génération : un guide pour visionnaires, révolutionnaires et challengers. Paris : Pearson.
- Pack, J. R., & Altshuler, A. (1989). Fragile foundations: A report on America's public works, national council on public works improvement. (Washington DC: US Government Printing Office, 1988); and Cities and Their Vital Systems: Infrastructure Past, Present, and Future, Jesse H. Ausubel and Robert Herman, eds. Washington DC: National Academy Press, 1988: Wiley Online Library.
- Pascual, R., Madariaga, R., Santelices, G., Godoy, D., & Drogue, E. L. (2016). A structured methodology to optimise throughput of production lines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 30 (1), 25–36.
- Paulk, M. C., Curtis, B., Chrissis, M. B., & Weber, C. V. (1993). Capability maturity model, version 1.1. IEEE software, 10 (4), 18–27.
- Pinjala, S. K., Pintelon, L., & Vereecke, A. (2006). An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. *International Journal of Production Economics*, 104 (1), 214–229.
- Rasmekomen, N., & Parlikad, A. K. (2016). Condition-based maintenance of multi-component systems with degradation state-rate interactions. *Reliability Engineering & System Safety*, 148, 1–10.

- Ruitenburg, R. J., & Braaksma, A. J. J. (2017). Evaluation of the Lifetime Impact Identification Analysis: Two tests in a changeable context. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 17, 42–49. doi: 10.1016/j.cirpj.2016.05.009.
- Ruschel, E., Santos, E. A. P., & Loures, E. d. F. R. (2017). Industrial maintenance decision-making: A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 45, 180–194.
- Schuerger, R., Arno, R., & Dowling, N. (2016). Why existing utility metrics do not work for industrial reliability analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (4), 2801–2806.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161–166.
- Schuman, C. A., & Brent, A. C. (2005). Asset life cycle management: towards improving physical asset performance in the process industry. *International Journal of Operations & Production Management*, 25 (6), 566–579.
- Shafiee, M. (2015). Maintenance strategy selection problem: an MCDM overview. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21 (4), 378–402.
- Singh, R. K., Gupta, A., Kumar, A., & Khan, T. A. (2016). Ranking of barriers for effective maintenance by using TOPSIS approach. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 22 (1), 18–34.
- Swanson, L. (2003). An information-processing model of maintenance management. *International Journal of Production Economics*, 83 (1), 45–64.
- Tang, D., Makis, V., Jafari, L., & Yu, J. (2015). Optimal maintenance policy and residual life estimation for a slowly degrading system subject to condition monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 134, 198–207.
- Torres Jr, A., & Gati, A. M. (2011). Identification of barriers towards change and proposal to institutionalize continuous improvement programs in manufacturing operations. *Journal of technology management & innovation*, 6 (2), 94–109.
- Visser, J. K., & Botha, A. (2015). Evaluation of the importance of the 39 subjects defined by the global forum for maintenance and asset management. *South African Journal of Industrial Engineering*, 26 (1), 44–58. doi: 10.7166/26-1-1081.
- Woodhouse, J. (2016). ISO 55000 : Gestion d'actifs - Ce qu'il faut faire et pourquoi ? Suisse : ISO. Repéré à www.iso.org.

- Zanjani, M. K., & Noureldath, M. (2014). Integrated spare parts logistics and operations planning for maintenance service providers. *International Journal of Production Economics*, 158, 44–53.
- Zhao, R., Wang, D., Yan, R., Mao, K., Shen, F., & Wang, J. (2018). Machine health monitoring using local feature-based gated recurrent unit networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (2), 1539–1548.