

Méthodologie d'étude et de la mise en place d'un modèle de maintenance 4.0

Par

Patrick William TOKI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAITRISE
EN GÉNIE, CONCENTRATION EN TECHNOLOGIES DE LA SANTÉ
M.Sc.A

MONTRÉAL, LE 18 DECEMBRE 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Patrick William Toki, 2023



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support, une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

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. Wong Tony, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Gardoni Mickaël, 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 26 OCTOBRE 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire, Dr Michel Rioux. Je le remercie d'avoir été un mentor pour moi, de m'avoir encadré, orienté, conseillé, motivé et aidé à réaliser les travaux de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, tous les intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches. Je pense particulièrement à Michel Bertrand, ing. Ph. D. qui a été un mentor, un guide et conseillé pour moi dans mon parcours académique.

Je remercie toutes les organisations et structures citées dans ce mémoire de m'avoir permis et donné l'opportunité d'avoir des cas spécifiques et des exemples concrets pour la réalisation des travaux de recherche de ce mémoire.

Je remercie ma famille qui a toujours été là pour moi, Jean, Rose, Louise, Françoise, Bill, Alida, Béatrice, Yanick... « Vous m'avez toujours envoyé des ondes positives et encouragé dans mes projets depuis mon établissement au Canada. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

Je remercie mes frères et sœurs pour leur encouragement. Je remercie très spécialement Bienim Jean qui a été un modèle, un mentor, une oreille attentive, un conseillé et qui a toujours été là pour moi. Je tiens à le remercier spécialement pour les sacrifices qu'il a dû faire pour moi, son soutien inconditionnel et ses encouragements.

Je remercie ma conjointe Kenesha Boulé qui m'a été d'un soutien quotidien inestimable dans tous les aspects de ma vie et particulièrement dans l'accomplissement de ce projet.

Je remercie tous mes amis Kenesha, Alex, Claude, Ghislain, Ibrahima, Cédric, Laetitia, Esspey...

Pour leur sincère amitié et confiance et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement.

VI

Enfin, je rends hommage et remercie mes parents Toki Ezechiel et Koutoukeng Jacqueline, qui m'ont donné la base de mon éducation et m'ont permis de devenir l'homme que je suis aujourd'hui, malgré qu'ils ne soient plus là aujourd'hui pour mes voir accomplissements et partager ces moments avec moi.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Méthodologie d'étude et de mise en place d'un modèle de maintenance 4.0

Patrick William TOKI

RÉSUMÉ

La maintenance dans l'industrie, ainsi que dans d'autres types de structures telles que les services publics, les hôpitaux, les mines est un des éléments indispensables pour leur bon fonctionnement. La plupart des méthodes et outils utilisés pour la maintenance sont souvent dépassés ou mal exploités, ce qui peut entraîner des pertes de temps, un bilan financier déficitaire et une dégradation de la qualité des services. Les audits et les visites effectuées dans les différentes organisations présentées dans ce mémoire nous ont permis de constater qu'elles font face à certaines problématiques similaires. En s'intéressant à celles-ci, nous leur avons proposé des outils d'évaluations de leurs méthodes de travail, processus et ressources. Nous avons proposé aussi quelques approches qui pourraient permettre d'implanter un modèle de maintenance 4.0.

Le modèle de maintenance 4.0 est une approche innovante qui consiste à restructurer l'organisation de la maintenance des équipements grâce à l'internet des objets, à l'intelligence artificielle, à l'exploitation et à la valorisation des données de maintenance.

Afin de répondre aux problématiques rencontrées, nous avons commencé par explorer les pratiques de maintenance, les méthodes et les algorithmes des traitements de données de maintenance existants. Nous avons proposé des actions préliminaires à effectuer avant de sélectionner un algorithme pour un modèle futur de maintenance 4.0. Dans une perspective de restructuration, nous avons étudié et proposé des outils de transformation numérique et de détection de maturité numérique.

Grâce aux différentes visites effectuées à la station d'épuration des eaux usées de Montréal, nous avons pu développer et proposer des idées, des outils et méthodes qui pourraient être exploitées dans le cadre de la transition des solutions analogiques vers des solutions numériques; avec comme objectif l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0.

Après avoir étudié le principe de fonctionnement de la maintenance biomédicale à l'hôpital Honoré-Mercier, nous leur avons proposé des méthodes d'étude de la maturité numérique et de sélection des algorithmes intelligents compatibles avec leurs modèles de maintenance et les équipements à maintenir. Nous leur avons aussi proposé des méthodes pour planifier les différentes étapes de mise en place d'un modèle de maintenance 4.0, afin d'optimiser leurs opérations et le taux de disponibilité des dispositifs.

Afin d'illustrer une des façons dont les données de maintenance pourraient être exploitées, nous avons dans le cadre de notre mission à Eldorado Gold Québec présenté des données valorisées d'alarmes des camions, afin de pouvoir effectuer un suivi de leurs utilisations par les opérateurs sous terre. Grâce à ce troisième exemple, nous avons pu aussi observer la différence au niveau des modèles de maturité numérique qui pourrait exister entre une

VIII

organisation qui souhaiterait passer de l'analogique à un modèle de maintenance 4.0 et une autre qui l'a débuté.

Mots Clés : technique d'analyse des données, intelligence artificielle, maintenance prédictive, maturité numérique, transformation numérique, capacité numérique, maintenance 4,0, feuille de route, biomédical, gestion de la maintenance, algorithmes intelligents

Methodology for studying and implementing a 4.0 maintenance model

Patrick William TOKI

ABSTRACT

Maintenance in industry, as well as in other types of structures such as public services, hospitals, mines is one of the essential elements for their proper functioning. Most of the methods and tools used for maintenance are often outdated or poorly exploited, which can lead to loss of time, a negative financial balance sheet and a deterioration in the quality of services. The audits and visits carried out in the various organizations presented in this thesis have enabled us to observe that they face certain similar problems. By taking an interest in these, we have offered them tools for evaluating their working methods, processes and resources. We have also proposed a few approaches that could help implement a 4.0 maintenance model.

The 4.0 maintenance model is an innovative approach that consists of restructuring the organization of equipment maintenance using the Internet of Things, artificial intelligence, and the exploitation and enhancement of maintenance data. To respond to the problems encountered, we began by exploring the maintenance practices, the methods and algorithms of existing maintenance data processing. We have proposed preliminary actions to perform before selecting an algorithm for a future 4.0 maintenance model. From a restructuring perspective, we have studied and proposed digital transformation and digital maturity detection tools.

Thanks to the various speeds carried out at the Montreal wastewater treatment plant, we were able to develop and propose ideas, tools and methods that could be used in the transition from analog to digital solutions; with the objective of implementing a 4.0 maintenance model.

After having studied the operating principle of biomedical maintenance at the Honoré-Mercier hospital, we offered them methods for studying digital maturity and selecting intelligent algorithms compatible with their maintenance models and the equipment to be maintained. We also offered them methods to plan the different stages of setting up a 4.0 maintenance model, to optimize their operations and the availability rate of the devices.

To illustrate one of the ways in which maintenance data could be used, as part of our mission at Eldorado Gold Quebec, we presented valued data from truck alarms, to be able to monitor their use by operators. underground. Thanks to this third example, we were also able to observe the difference in digital maturity models that could exist between an organization that would like to move from analogy to a 4.0 maintenance model and another that has started it.

Keywords: data analysis technique, artificial intelligence, predictive maintenance, digital maturity, digital transformation, digital capability, maintenance 4,0, roadmap, biomedical, maintenance management, intelligent algorithms

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Sélection des articles de revue des algorithmes de traitement des données de maintenance.....	5
1.1.2 Comparaison et regroupement des algorithmes d'apprentissage et de classification des données	7
1.1.3 Synthèse	8
1.2 Sélection des articles de revue de la maintenance	9
1.2.1 Les objectifs de la maintenance	9
1.2.1.1 Les bonnes pratiques de la maintenance.....	10
1.2.2 La contribution de la maintenance dans le système manufacturier	11
1.2.3 Les techniques de maintenance, la maintenance 4.0 et l'industrie 4.0	16
1.2.4 L'importance de réunir le nouveau et l'ancien en maintenance	21
1.2.4.1 La gestion de la maintenance et nouvelles technologies	21
1.2.4.2 Les technologies de la maintenance 4.0 dans un contexte manufacturier	21
1.4 Gestion de la transition numérique vers un modèle de maintenance 4.0.....	22
1.1.4 Transformation numérique	22
1.4.1.1 Les ressources	25
1.4.1.2 Systèmes d'information	28
1.4.1.3 Organisation de la structure	31
1.4.1.4 La culture	34
1.1.5 Gestion du changement.....	39
1.1.6 Les origines du changement	42
1.1.7 Critères de succès et d'échecs.....	43
1.1.8 Évaluation des indices de maturité numérique	49
CHAPITRE 2 PROPOSITION D'UNE MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDES PRÉLIMINAIRES D'IMPLÉMENTATION D'UN MODÈLE DE MAINTENANCE 4.0 ET DE PRÉSÉLECTION D'ALGORITHMES DANS UNE ORGANISATION.....	55
2.1 Études préliminaires d'élaboration d'un projet de maintenance 4.0	55
2.1.1 Maturité numérique.....	55
2.1.2 Transformation numérique.....	62
2.1.3 Critères de succès et d'échecs.....	64
2.1.4 Gestion de changement	65
2.2 Méthodes d'études préliminaires du processus de fonctionnement d'une organisation en vue de l'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0.....	66

2.2.1	Parc matériel et possibilités d'interconnexion via l'internet des objets.....	67
2.2.2	Processus de transmission des données via des capteurs intelligents	68
2.2.3	Procédure d'analyse des méthodes de suivi, de vérification et d'interprétation des données	71
2.2.3.1	Examen du suivi des données.....	71
2.2.3.2	Examen des procédures de vérification et d'interprétation des données.....	73
2.2.4	Étude de la construction des modèles de données	73
2.2.5	Étude des moyens d'alerte et demande des travaux de maintenance.....	76
2.2.6	Processus de validation et d'approbation des travaux de maintenance	77
2.3	Études préliminaires du processus de transformation des données de maintenance	78
2.3.1	Procédé de sélection des algorithmes de traitement de données de maintenance	78
2.3.1.1	Sauvegarde des données	79
2.3.1.2	Exploitation des données	80
2.3.2	Arbre décisionnel de choix d'un algorithme de traitement des données de maintenance.....	84
2.4	Déploiement d'un modèle de maintenance 4.0 : Analyse préliminaire.	88
2.5	Outils d'aide à la réalisation d'une Feuille de route pour l'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0	90
CHAPITRE 3	VIGIE TECHNOLOGIQUE ET MÉTHODOLOGIE D'AMÉLIORATION DU SYSTÈME DE MAINTENANCE EXISTANT : CAS DE LA STATION D'ÉPURATION DES EAUX USÉES.....	93
3.1	Vigie technologique pour l'étude de la transformation numérique : Cas de la station d'épuration des eaux usées de Montréal.....	93
3.1.1	Principe de fonctionnement de l'usine.....	93
3.1.2	Secteur 656 des pompes à boues.....	95
3.1.3	Processus de maintenance et équipements industriels	95
3.1.3.1	Ressources logicielles et processus de traitement des données de la maintenance.....	96
3.2	Suggestion d'idées d'amélioration des opérations de maintenance.....	98
3.2.1	Facteurs à considérer lors de l'amélioration des systèmes de maintenance	99
3.2.2	Proposition des quelques évolutions futures du projet.....	100
CHAPITRE 4	VIGIE TECHNOLOGIQUE ET MÉTHODOLOGIE D'AMÉLIORATION DU SYSTÈME DE MAINTENANCE EXISTANT : CAS DE L'HOPITAL HONORÉ-MERCIER.....	105
4.1	Vigie technologique pour l'étude de la transformation numérique : Cas de l'Hôpital Honoré-Mercier	105
4.1.1	Principe de fonctionnement de la maintenance biomédicale	106
4.1.2	Vigie technologique du secteur biomédical de l'hôpital Honoré-Mercier.....	113
4.2	Suggestion d'idées d'améliorations des opérations de maintenance à Honoré-Mercier	125

4.2.1	Amélioration des opérations de maintenance des équipements biomédicaux sous contrat de service.....	125
4.2.2	Amélioration des opérations de maintenance des équipements biomédicaux sans contrats	130
4.3	Les Méthodes d'analyse et d'intégration des logiciels de traitement de données de la maintenance existants dans un modèle de maintenance 4.0 : cas de l'hôpital Honoré-Mercier	134
4.2.3	Analyse de maturité numérique orientée vers un modèle de maintenance 4.0	135
4.2.3.1	Capacité numérique	136
4.2.3.2	Indices de maturité numérique.....	137
4.2.3	Proposition de choix d'algorithmes	147
4.3	Analyses des réponses aux questions et propositions de quelques algorithmes pour la construction d'un modèle d'apprentissage de données.	150
4.4	Proposition d'une feuille de route en vue d'une éventuelle implémentation d'un modèle de maintenance 4.0 à Honoré-Mercier.....	152
CHAPITRE 5	EXEMPLE DE VALORISATION DE DONNÉES DE DYSFONCTIONNEMENT : CAS DE LA MINE D'ELDORADO GOLD QUÉBEC.....	159
5.1	Mise en contexte du projet de valorisation des données d'alarmes des camions de la mine.....	159
5.2	Matrice de maturité.....	161
5.3	Principe de valorisation des données de dysfonctionnement.....	168
5.4	Exemple de la valorisation des quelques données d'alarmes	169
5.4.1	Valorisation des données de production	170
5.4.2	Valorisation des données des alarmes des camions	174
CHAPITRE 6	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	185
6.1	Recommandations pour le plan d'implémentation du modèle de maintenance 4.0 à la station d'épuration des eaux usées de Montréal.....	185
6.2	Plan de mise en connexion du modèle de maintenance 4.0 : cas de l'hôpital Honoré-Mercier	189
6.2.1	Vigie technologique de la maintenance interne et externe	191
6.2.2	Discussion sur les solutions qui pourront améliorer la maintenance	193
6.2.3	Discussion sur la maturité numérique, la capacité numérique.....	194
6.2.4	Discussion sur l'intégration des algorithmes de traitement de données dans la maintenance et choix de la configuration GMAO.....	195
6.2.5	Discussions sur la feuille de route	201
6.3	Avantages et inconvénients du modèle prévisionnel de maintenance 4.0.....	202
6.4	Analyse économique.....	205
CHAPITRE 7	BILAN ET PERSPECTIVES.....	209
7.1	Bilan.....	209
7.1.1	Récapitulatif des méthodes de travail et d'analyses.....	209

7.1.2	Bilan organisationnel	211
7.1.3	Bilan maintenance.....	214
7.1.4	Bilan de veille technologique.....	215
7.1.5	Bilan financier.....	216
7.1.6	Bilan innovation.....	216
7.2	Bilan de maintenance 4.0 des organisations étudiées	216
7.3	Limites et difficultés de l'implémentation du modèle prévisionnel de maintenance 4.0	224
7.4	Perspectives et évolution future du modèle de maintenance 4.0	227
CONCLUSION.....		233
ANNEXE I	REVUE DE LITTÉRATURE DE QUELQUES ALGORITHMES INTÉLLIGENTS.....	235
ANNEXE II	MODULES OCTOPUS.....	263
ANNEXE III	FOMULAIRE DE VÉTUSTÉ.....	265
ANNEXE IV	FICHE DE VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE.....	267
LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		279

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Matrice de maturité de la maintenance prédictive16
Tableau 1.2	Estimation linguistique de l'adéquation des techniques d'entretien19
Tableau 1.3	Valeurs numériques de Décision multi-attributs Fabrication.....20
Tableau 1.4	Tableau récapitulatif des phases et sous-phases de la thèse.....40
Tableau 1.5	Liste structurée des facilitateurs de maintenance de la transformation numérique.....47
Tableau 1.6	La matrice de maturité des entreprises51
Tableau 2.1	Éléments de maturité numériques à analyser57
Tableau 4.1	Veille technologique des prestations sur les équipements biomédicaux sous contrat de service, cas de l'hôpital Honoré-Mercier.115
Tableau 4.2	Veille technologique des procédures de maintenance des équipements biomédicaux sous contrat de service, cas de l'hôpital Honoré-Mercier117
Tableau 4.3	Veille technologique et logicielle des équipements biomédicaux sous contrat de service, cas de l'hôpital Honoré-Mercier.....119
Tableau 4.4	Veille technologique des prestations sur les équipements biomédicaux sans contrat de service, cas de l'hôpital Honoré-Mercier121
Tableau 4.5	Veille technologique des procédures de maintenance des équipements biomédicaux sans contrat de service, cas de l'hôpital Honoré-Mercier.....122
Tableau 4.6	Veille technologique logicielle des équipements biomédicaux sans contrat de service, cas de l'hôpital honoré Mercier124

Tableau 4.7	Exemple de modèle d'évaluation de la maturité numérique du projet de maintenance 4.0 à l'hôpital honoré Mercier.....	138
Tableau 4.8	Tableau récapitulatif de l'analyse de maturité du département (Maintenance) et Génie biomédical	139
Tableau 4.9	Tableau récapitulatif de l'analyse de maturité du département (Maintenance) et Génie biomédical (suite 1)	141
Tableau 4.10	Tableau récapitulatif de l'analyse de maturité du département (Maintenance) et Génie biomédical (suite 2)	143
Tableau 5.1	Évaluation d'indices des maturités numériques de la mine Eldorado Gold Québec.....	162
Tableau 5.2	Justificatifs des scores de maturité numériques attribués à chaque indice....	163
Tableau 5.3	Mise en évidence de la tendance d'évolution hebdomadaire du nombre de types d'évènements par camion.....	182
Tableau 6.1	Avantages et inconvénients d'avoir un modèle de maintenance 4.0 à Honoré-Mercier.	202
Tableau 6.2	Avantages et inconvénients d'avoir un modèle de maintenance 4.0 à Honoré-Mercier (suite).....	204
Tableau 7.1	Récapitulatif de l'analyse des différents cas d'organisations étudiées.....	216
Tableau 7.2	Récapitulatif de l'analyse des différents cas	220
Tableau 7.3	Synthèse de l'analyse des différents cas d'organisations étudiées.....	221
Tableau 7.4	Comparaison des deux cas extrêmes du niveau de maturité des organisations étudiées.....	223

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Application de la veille pour la réutilisation des produits.....1
Figure 1.1	Organigramme d'évolution de la revue de littérature des algorithmes de traitement des données de maintenance7
Figure 1.2	L'apport des processus de maintenance pour une maintenance durable.....12
Figure 1.3	Flux d'informations dans le cycle de vie des objets techniques13
Figure 1.4	Phases chronologiques de la Maintenance Analytics.....15
Figure 1.5	Matrice de maturité de la maintenance prédictive15
Figure 1.6	Réseau structurel23
Figure 1.7	Modélisation de l'indice de maturité Acatech Industrie 4.024
Figure 1.8	Capacités du domaine structurel « ressources »25
Figure 1.9	Capacités recommandées dans les ressources du domaine structurel27
Figure 1.10	Capacités requises dans le système d'information du31
Figure 1.11	Capacités requises dans l'organisation de la structure du domaine structurel .33
Figure 1.12	Capacités requises dans la culture du domaine structurel38
Figure 1.13	Représentation des critères et des facteurs de succès.....43
Figure 1.14	Représentation graphique des critères et facteurs de succès44
Figure 1.15	Étapes entre les phases conceptuelles et opérationnelles d'un projet45
Figure 1.16	Représentation graphique des critères.....46
Figure 2.1	Interrelation entre les 8 groupes des éléments d'indice de maturité59

Figure 2.2	Interrelation réorganisée entre les 8 groupes des éléments d'indice de maturité.....	60
Figure 2.3	Interrelation réorganisée entre les 8 groupes des éléments d'indice de maturité en remplaçant les simples lignes droites par des flèches à sens unique et en appliquant la notion de causalité.....	61
Figure 2.4	Étapes du parcours de développement de l'Industrie 4.0 (FIR e. V. at RWTH Aachen University).....	62
Figure 2.5	Arbre de décision du choix d'un algorithme.....	83
Figure 2.6	Zoom sur la maintenance hors ligne (non connectée).....	85
Figure 2.7	Méthodologie d'introduction d'une feuille de route dans un processus d'industrie 4.0.....	91
Figure 3.1	Graphique du déroulement de la collaboration au niveau de la réalisation des tâches sur le projet de la station d'épuration des eaux usées de Montréal.....	102
Figure 4.1	Organigramme du fonctionnement de la maintenance biomédicale à l'hôpital.....	109
Figure 4.2	Méthodes d'algorithmes non paramétriques sélectionnées.....	151
Figure 4.3	Méthodes d'algorithmes non supervisées sélectionnées.....	152
Figure 4.4	Feuille de route proposée pour le projet de Maintenance 4.0 à Honoré-Mercier.....	153
Figure 5.1	Organisation du flux d'informations vers la salle de contrôle à la mine Eldorado Gold Québec.....	160
Figure 5.2	Évolution du taux de panne en courbe « baignoire ».....	168

Figure 5.3	Illustration de la plateforme de suivi des camions Power bi.	171
Figure 5.4	Exemple de valorisation des données de production provenant	172
Figure 5.5	Visuel de déclenchement des alarmes de mauvaise utilisation des camions	173
Figure 5.6	Visuel produit à partir des données exportées de « MET Reporter »	175
Figure 5.7	Donnée des alarmes provenant directement de la plateforme Power bi	176
Figure 5.8	Visuel produit à partir des données exportées de Power Bi	178
Figure 5.9	Évolution du score total de chacun des événements par semaine	179
Figure 5.10	Mise en évidence de la tendance et de la répartition.....	181
Figure 6.1	Proposition d'un modèle de communication entre les algorithmes intelligents de traitement de données et le système GMAO.	196
Figure 6.2	Architecture GMAO locale client/serveur	198
Figure 6.3	Architecture GMAO WEB.....	199
Figure 6.4	Architecture GMAO mixte (local client/serveur et WEB).....	200

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

mRMR	minimum Redundacy Maximum Relevance
MID	Mutual Information Difference
MIQ	Mutual Information Quotient
MD	Mahanalobis Distance
ACP	Analyses de Composantes Principales
TSV	Tab-Separated Values
CSV	Comma Saparated Values
HTML	Hyper Text Markup Language
XML	Extensible Markup Language
SVM	Support Vector Machine
FCM	Fuzzy C-mean

INTRODUCTION

La maintenance 4.0 un concept qui pourrait faire naître dans les industries un environnement stimulant dans lequel elles utilisent plusieurs approches et outils technologiques afin d'augmenter l'efficacité, la performance, la sécurité de leurs produits, de leurs infrastructures et de leurs environnements. Son but est de réduire les défaillances, d'augmenter la fiabilité et la disponibilité opérationnelle des actifs avec des décisions basées sur l'interprétation des données obtenues grâce aux nouvelles technologies et aux objets interconnectés. Ceci afin d'accroître la qualité des produits et la satisfaction des utilisateurs. Les modules électroniques faisant partie intégrante dans la majorité de ces produits ou systèmes industriels, nous avons donc vu naître et s'accroître une surveillance en temps réel de ces modules qui sont indispensables afin de prédire les défaillances, d'assister l'administration et la logistique. Ceci contribue donc à établir un pronostic de l'étendue des dégradations et des états de santé futurs des systèmes en fonction de l'historique et de l'état actuel afin d'optimiser leur durée de vie. (Kang, 2020)

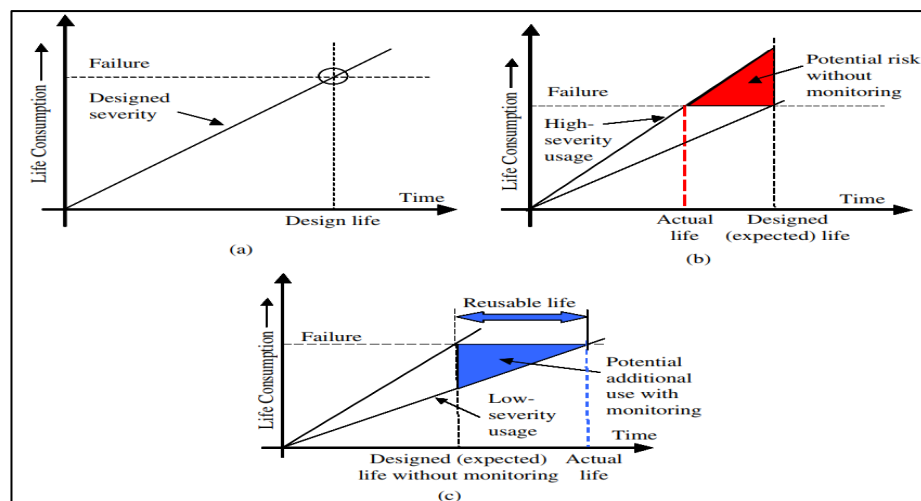


Figure 0.1 Application de la veille pour la réutilisation des produits.

(a) Utilisation conforme à la conception,

(b) Utilisation plus sévère que la conception prévue,

(c) Utilisation moins sévère que la conception prévue

Tirée de Kang, Michael G. Pecht and Myeongsu (2020, p. 6)

Un des problèmes des industries de nos jours, est qu'ils consomment des budgets considérables et mobilisent différentes ressources significatives au niveau de la maintenance de leurs systèmes. Ceci suscite donc leur intérêt à la maintenance 4.0 qui est un concept qui pourrait leur permettre d'optimiser leurs méthodes de travail et d'effectuer des économies considérables ; mais la question reste encore de savoir comment l'implanter. Répondre à cette préoccupation nous motive donc à diriger nos recherches vers la définition d'une méthodologie d'implantation d'une maintenance 4.0. Ce qui nous amène donc à nous pour les **questions de recherches** suivantes:

- Quelle méthodologie suivre pour l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0 ?
- Comment améliorer les processus et la mobilisation des ressources d'une organisation à partir de la maintenance 4.0 ?
- Quelles méthodes ou processus utiliser pour effectuer le choix d'un algorithme intelligent de traitement des données de maintenance d'une organisation ?

Afin de répondre à ces questions problématiques, nous allons diviser notre travail en trois missions, afin d'avoir des exemples provenant des organisations de types et de niveaux de maturités différents.

Notre première mission à la station d'épuration des eaux usées de Montréal consistera à effectuer un audit et à leur proposer un plan d'action de gestion du changement, de transition numérique, d'exploitation des données de maintenance, des algorithmes intelligents et de l'internet des objets afin d'améliorer la santé des leurs infrastructures. Selon le mandat qui nous a été conféré par la station pour leur première phase de projet de maintenance 4.0 ; nous nous limiterons dans cette première mission au stade de la vigie technologique des sections mentionnées, afin de leur faire des recommandations préliminaires basées sur nos audits.

La deuxième mission de notre recherche sera réalisée à l'hôpital Honoré-Mercier où nos objectifs en plus de ceux mentionnés pour précédent projet seront d'observer leurs pratiques de maintenance actuelles et de leur proposer un plan qui permettrait d'évoluer selon un modèle de maintenance 4.0.

Notre objectif sera d'établir une feuille de route pour la conduite du projet de maintenance 4.0, des études préliminaires jusqu'à l'installation d'une maintenance prédictive basée sur des algorithmes d'intelligence artificielle exploitant des données de maintenance existantes. Nous nous étudierons l'état actuel de maintenance biomédicale à l'hôpital Honoré-Mercier, afin de pouvoir leur proposer des outils et un plan d'action qui leur permettra de migrer vers le modèle de maintenance 4.0. Ce plan d'action pourrait leur permettre de mettre en place un système qui sera adéquat pour accueillir les algorithmes intelligents une fois qu'ils auront sauvegardé suffisamment de données exploitables des équipements et des pratiques.

L'objectif de nos recherches dans cette mission sera de définir des outils, des processus et des démarches reproductibles d'aides aux décisions qui permettraient de mettre en place un système de maintenance 4.0 et de choisir l'algorithme ou les algorithmes intelligents adéquats pour les équipements. Il sera question pour nous d'identifier les études préliminaires avant l'implantation d'un système de maintenance 4.0 dans une industrie ou plus spécifiquement dans le milieu biomédical.

Notre troisième mission qui sera réalisée à la mine Eldorado Gold Québec nous permettra de présenter l'exemple d'une organisation ayant un niveau de maturité un peu plus avancé et intégrant la valorisation de données pour la gestion des opérations de maintenance actuelles.

Afin d'être en mesure d'apporter des réponses à nos problématiques, nous commencerons par effectuer une revue de littérature des algorithmes de traitement et d'analyses de données existantes. Nous effectuerons aussi une revue de littérature des pratiques en maintenance, de la maturité numérique, la gestion du changement et la transformation numérique. Nous allons par la suite établir des outils et des méthodes d'études préliminaires d'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0 et de présélection des algorithmes de traitement des données. Nous proposerons une façon d'étudier l'environnement dans lequel pourrait être implanté un modèle. Nous étudierons comment établir un plan de déploiement et d'analyse économique et nous répertorierons quelques limites du modèle de maintenance 4.0, ses perspectives et évolutions futures.

Afin de nous aider à valider notre démarche de recherche, nous allons répondre aux questions du **Tableau-A IV-2 de l'outil de définition du cadre de recherche tiré de *Academic-toolkit***.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La notion de pronostic de maintenance abordée dans l'introduction générale nous permet d'introduire la notion de maintenance et d'apprentissage automatique. La maintenance préventive permet de résoudre les pannes alors que le prédictif permet de mieux réaliser les prévisions afin de veiller sur les tendances pour être capable de prédire les pannes et de peut-être les éviter. Le but de faire de la maintenance prédictive en utilisant un modèle de maintenance 4.0 est de mieux réaliser la maintenance préventive. Il s'agira dans ce chapitre de présenter l'état de l'art dans le domaine de la transition numérique, la maintenance prédictive et le pronostic. Notre travail ici consistera à explorer les pratiques de maintenance dans les organisations, les méthodes des algorithmes de traitement des données de maintenance et outils d'aide à la transition et la transformation numérique. Pour commencer, nous allons regrouper les modes opératoires des algorithmes de notre revue de littérature en fonction de leur utilisation, ensuite nous allons présenter d'abord un résumé de quelques articles que nous avons sélectionnés par catégorie d'algorithmes pour notre revue. Ensuite, nous allons effectuer une revue pour présenter quelques pratiques de maintenance, les outils de détection de maturité numérique et d'aide à la gestion de changement. Enfin, nous allons effectuer une synthèse de ces algorithmes tout en décrivant un processus de choix des méthodes expérimentales que nous mettrons en pratique plus tard.

1.1 Sélection des articles de revue des algorithmes de traitement des données de maintenance

Dans cette section, nous allons nous concentrer uniquement sur la classification des modes opératoires des algorithmes figurant dans notre revue de littérature. Il existe une multitude d'algorithmes de traitement de données, mais nous nous sommes focalisés dans cette revue uniquement sur ceux qui peuvent être utilisés dans le cadre de la maintenance.

Afin d'effectuer une présentation de l'état d'art dans le domaine de la maintenance 4.0, nous avons segmenté la première partie de notre revue de littérature en parties. Une première partie de revue de littérature sur les algorithmes de prétraitement, d'entraînement et la classification des données de maintenance, qui permet de préparer les données et de les rendre conformes; avant leurs exploitations pour la construction d'un modèle de données de maintenance et son affectation à un groupe spécifique selon ses caractéristiques. Ces grandes étapes sont généralement intégrées dans le processus de traitement de données qui sont analysées plus tard pour l'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0. Nous avons ensuite choisi pour chaque étape des concepts de traitement de données en rapport avec notre thème de recherche. Nous avons présenté (Annexe I) les méthodes mises en avant en rapport avec chaque concept tout en citant quelques exemples utilisés dans les articles passés en revue. Nous n'avons présenté que la synthèse de la revue de littérature dans cette partie (Figure 1.1), mais par contre la revue complète de cette partie se trouve en Annexe I.

Dans la deuxième partie, nous avons effectué une revue de littératures des pratiques de maintenance, son rôle dans l'industrie 4.0. Nous avons aussi défini la notion de maintenance 4.0 ainsi et adressé l'importance si c'est nécessaire de lier le nouveau et l'ancien dans un processus de transition.

Dans la troisième partie de notre littérature, nous avons effectué un tri et présenté l'état de l'art des modèles de maturités numériques, de gestion de changement et de la transformation numérique. Nous avons aussi répertorié des critères de succès d'un projet de maintenance 4.0 et transition numérique.

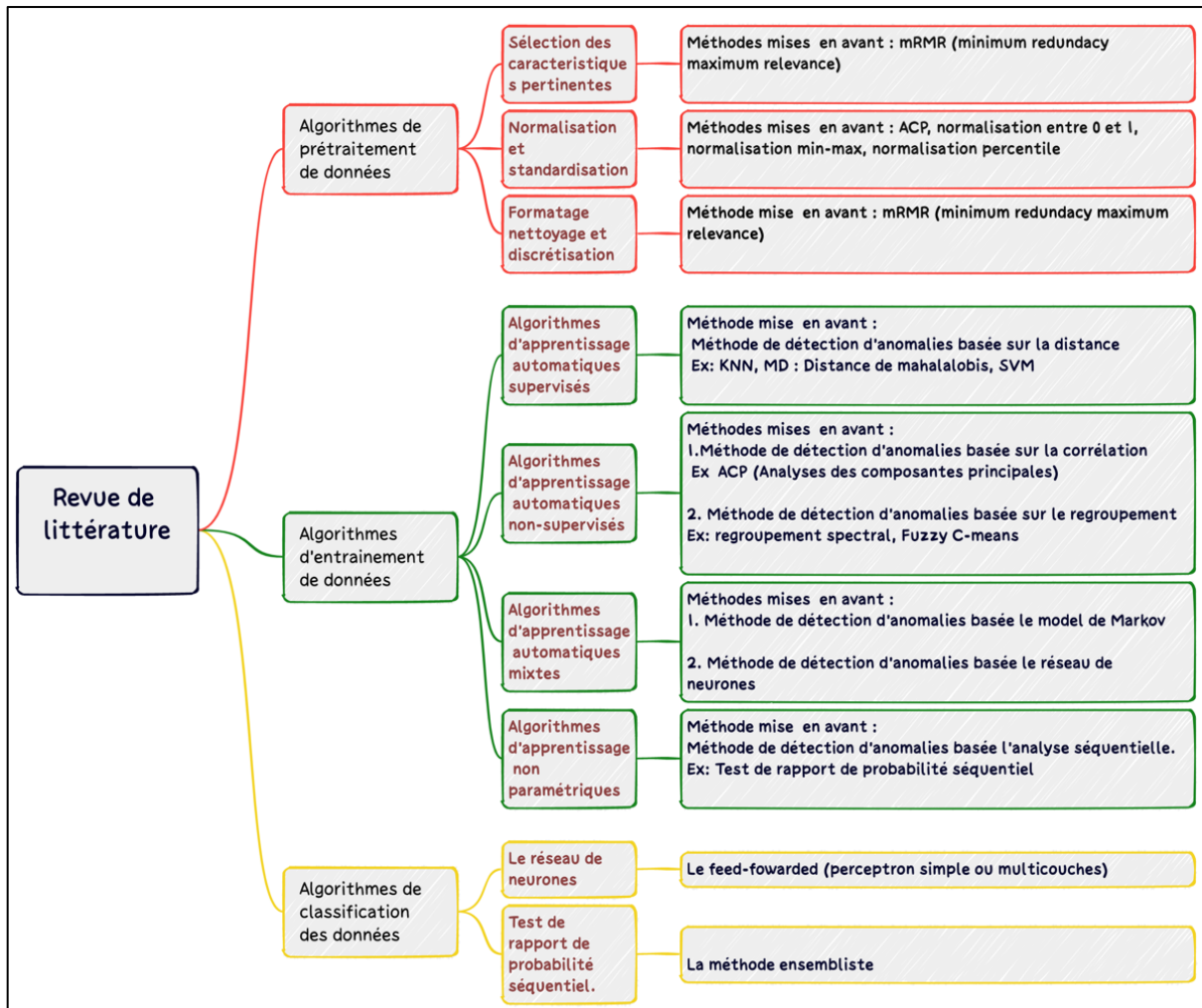


Figure 1.1 Organigramme d'évolution de la revue de littérature des algorithmes de traitement des données de maintenance

1.1.2 Comparaison et regroupement des algorithmes d'apprentissage et de classification des données

La classification pourrait être en elle-même une méthode utilisée dans les algorithmes de traitement des données de maintenance comme moyen d'entraînement pour créer un modèle de données, mais elle peut aussi être utilisée dans une autre méthode comme étapes d'affectation des données à un groupe précis selon des critères définis. Les algorithmes de

classification contrairement aux autres méthodes d'algorithmes d'apprentissage permettent d'obtenir des résultats plus rapidement à cause des critères de regroupements des données qui sont moins complexes. Le tri des données dans la classification est plus rapide, mais le temps d'entraînement des données peut être relativement long. Une autre des raisons pour lesquelles la classification fournit des résultats plus rapidement par rapport aux autres algorithmes, est qu'elle ne nécessite pas forcément au préalable un volume important de données avant de commencer à construire un modèle d'entraînement, ce qui pourrait augmenter le taux d'erreur et de classification. Comme on peut le voir sur le site de *Scikit learn* (<https://scikit-learn.org/stable/>), les méthodes d'apprentissage et de traitement des données peuvent être regroupées en quelques catégories, à savoir :

- La classification : Elle identifie à quelle catégorie un objet appartient,
- La régression : Elle prédit un attribut à valeur continue associée à un objet,
- Le regroupement (Clustering) : Regroupe automatiquement les objets similaires en ensembles,
- Réduction de dimensions : Réduit le nombre de variables aléatoires à considérer,
- Sélection de modèles : Compare, valide et choisit les paramètres et les modèles,
- Le prétraitement (préprocessing) : extraction et normalisation de caractéristiques.

La majorité des concepts (Kmean, KNN, RNN, SVM etc.) qui sont utilisés pour développer des algorithmes de traitement de données de maintenance pourraient faire partie en même temps des multiples catégories citées ci-dessus, ce qui signifie qu'on pourrait leur donner des orientations différentes en fonction de l'utilisation et de l'application qu'on en fait.

1.1.3 Synthèse

Il existe différentes techniques de traitement et d'exploitation des données de maintenance, mais il faut toujours fixer les variables (modèle mathématique + paramètres) du modèle d'algorithme qu'on choisit. Cependant, en effectuant son choix, il est important de garder à l'esprit l'importance d'avoir des modèles de données stable et fiable.

Une fois qu'on possède suffisamment de données pour la phase d'apprentissage de l'algorithme intelligent de traitement des données de maintenance qu'on veut construire, il est important de vérifier la qualité de ces données. Le déséquilibre des colonnes au niveau des données est l'un des critères à vérifier si on voudrait pouvoir les exploiter. On peut s'appuyer sur le déséquilibre de données pour cibler les caractéristiques qu'on pourrait a priori considérer comme plus importantes pour les algorithmes d'apprentissage et de classification. Une fois qu'on a ciblé les données les plus significatives et porteuses d'informations indispensables, on peut rajouter des données d'apprentissage au niveau des colonnes qui en manque afin de minimiser le taux d'erreur lors d'un apprentissage lorsqu'on est face à des données déséquilibrées. On peut réduire aussi les données au niveau des colonnes en excès afin de réduire l'écart trop important entre les lignes ; mais il faut faire attention au fait de pouvoir garder une variété qui représente bien notre modèle de données. Les autres moyens de validation de la qualité des données sont : le tri, la randomisation, le filtre, etc.

Les données qu'on utilise pour entraîner notre système ne doivent pas être les mêmes qu'on utilise pour le valider afin d'éviter que notre modèle ne se spécialise trop et qu'au moment où l'on décide de lui passer des données autres que ceux de l'apprentissage qu'il baisse en performance et qu'il ne soit plus capable de généraliser.

On peut aussi utiliser la *cross validation* qui consiste à sélectionner plusieurs fois le même pourcentage de données pour l'apprentissage, mais en variant les valeurs des données prises à chaque fois, afin d'éviter que l'étape d'apprentissage ne soit trop facile. Il est possible de le faire sur le site internet de *sickit learn* : *autoslearn Tipot*. Il faut faire attention au taux d'erreur, car plus les données sont importantes, plus le taux d'erreur même s'il est minuscule pourra être significatif.

1.2 Sélection des articles de revue de la maintenance

1.2.1 Les objectifs de la maintenance

Les objectifs de la maintenance peuvent être divisés en plusieurs catégories :

- Assurer le fonctionnement des actifs (disponibilité, fiabilité, qualité du produit, etc.).

- Assurer la durée de vie de la conception,
- Assurer la sécurité des actifs et de l'environnement,
- Assurer la rentabilité de la maintenance,
- Assurer une utilisation efficace des ressources (ressources et matières premières).

Les capacités de production doivent toujours être au maximum. Les organisations commencent à se soucier de nos jours du suivi des paramètres qui pourraient affecter la disponibilité de leurs équipements et leurs plants. Une fois que le produit fini est délivré, une des questions que toutes ces organisations se posent souvent est de savoir le cout de la maintenance et de l'entretien des actifs afin de déterminer leurs rentabilités et leur efficacité.

Une des questions de base en maintenance qu'on a toujours essayée de ressourdre au fil des années, c'est comment maximiser la disponibilité et minimiser les couts ? Différents moyens tels que la variété des méthodologies, des technologies et des indicateurs ont été généralement développés afin de répondre à cette question et d'observer les impacts des améliorations.

1.2.1.1 Les bonnes pratiques de la maintenance

Une des bonnes pratiques de maintenance serait la coordination et la collaboration entre la planification des activités de production et de maintenance. Ajouté à cette pratique, on peut dire qu'une maintenance possède de bonnes pratiques si l'élaboration de ses activités intègre les éléments tels que :

Le besoin de mesurer les performances de la maintenance

- La création de la valeur pour les consommateurs
- L'amélioration de l'efficacité des opérations
- L'améliorer la rentabilité (Augmenter les capacités opérationnelles et réduire les couts)
- La Création de la valeur ajoutée en délivrant plus et de meilleurs services innovateurs.
- La possibilité d'atteindre le niveau compétitivité.
- L'augmentation de la qualité des services de maintenance

Il est important de ne pas regarder la maintenance comme une dépense qui permet ou une perte qui permettrait de garder le processus de production opérationnel. Ceci ferait en sorte que la maintenance ne soit pas considérée comme une priorité, mais plutôt comme un volet secondaire.

L'évaluation des performances de la maintenance devrait aussi passer par le soulignement des améliorations en même temps que la détection des problèmes et les solutions proposées.

Il est aussi important de se poser la question de savoir si en respectant les bonnes pratiques de maintenance on atteindrait ses objectifs. Si on atteint ces objectifs alors on peut être rassuré quant aux pratiques qu'on utilise pour savoir si elles sont bonnes. (Galar D, 2016)

On peut aussi considérer ces bonnes pratiques de maintenance comme un moyen d'atteindre les capacités des actifs au niveau des activités et de l'économie ; ou comme un moyen pour les ingénieurs d'optimiser les capacités des équipements. (Marcus Bengtssona, 2018)

1.2.2 La contribution de la maintenance dans le système manufacturier

La littérature nous a révélé que la mise en place d'un système de maintenance durable par deux dimensions essentielles :

- L'aspect durabilité
- L'aspect cycle de vie

L'aspect durabilité est représenté à trois niveaux : économique, environnemental et social. La figure 1.2 ci-dessous nous présente la contribution de chacun de ces aspects au niveau de la maintenance.

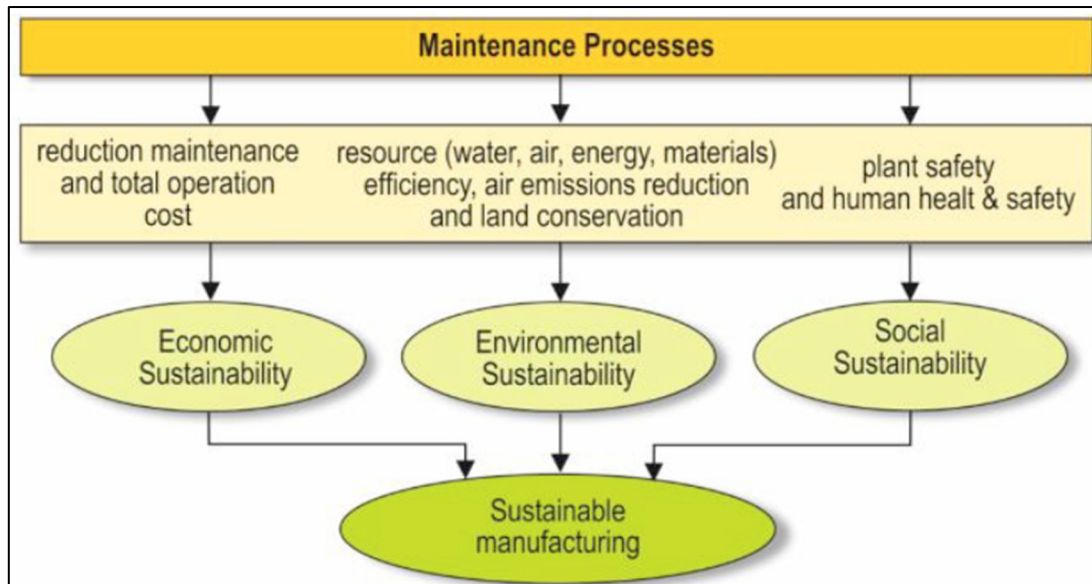


Figure 1.2 L'apport des processus de maintenance pour une maintenance durable

Tiré de Małgorzata Jasiulewicz - Kaczmarek, Arkadiusz Gola (2019, p. 92)

Il existe quatre facteurs économiques qui sont affectés par le fonctionnement de la maintenance ; à savoir : la qualité et la productivité, le respect des délais, l'innovation et les coûts. En raison du respect de l'environnement, les facteurs suivants peuvent être distingués tels que :

- La prévention des dégâts environnementaux,
- La réduction des émissions,
- La préservation des terres,
- La réduction de la consommation d'énergie,
- L'efficacité et la réserve d'énergie.

L'aspect social implique la relation entre les associés à l'intérieur et à l'extérieur de la compagnie avec une focalisation sur le personnel de maintenance qui est affecté par les décisions faites par le département de maintenance. La contribution de la maintenance dans l'aspect social est aussi reliée à la sécurité des plantes, des humains, et permet aussi d'éviter les défaillances indésirées et de minimiser leurs conséquences.

La deuxième dimension de contribution à un système de maintenance durable est la réflexion sur le cycle de vie. Figure 1.3

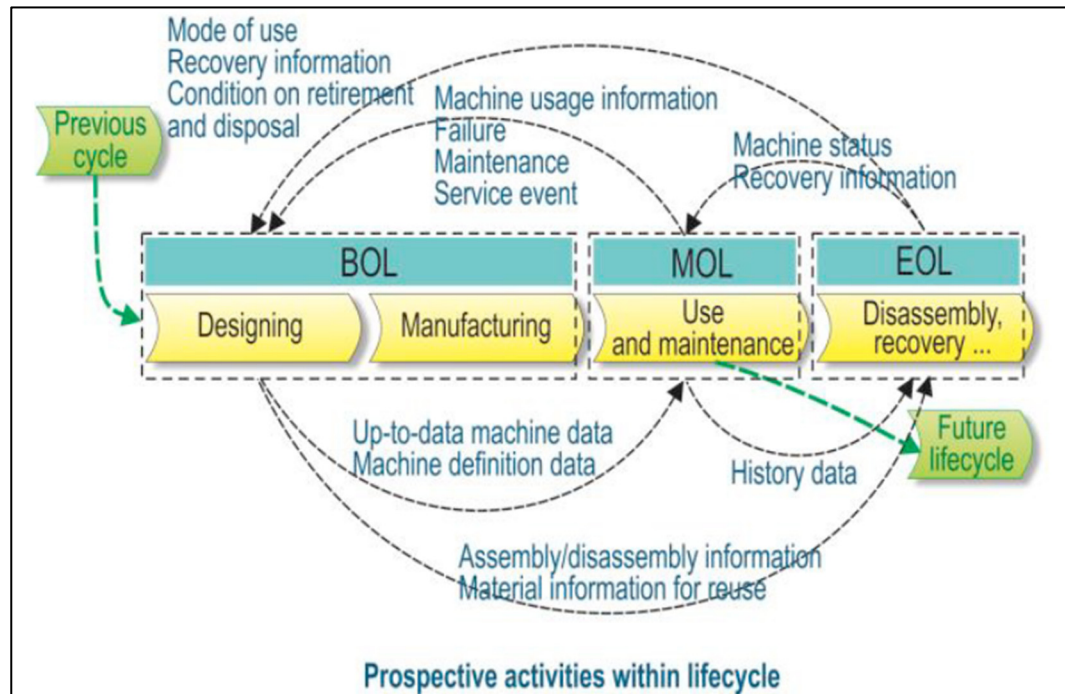


Figure 1.3 Flux d'informations dans le cycle de vie des objets techniques
Tiré de Małgorzata Jasiulewicz - Kaczmarek, Arkadiusz Gola (2019, p. 92)

La maintenance doit:

- Être alignée avec l'activité et les objectifs de rentabilités.
- Permettre de garder un niveau fonctionnel et préserver toutes les caractéristiques des machines, tout en respectant les requis d'un point de vue impact environnemental.
- Être alignée avec les attentes sociales (satisfaction des employés, leur santé et sécurité)

Une des questions essentielles concernant ces trois points est de savoir comment atteindre ces objectifs et quoi faire ? (Bilge, 2017) répond à cette question en précisant que le potentiel des technologies de la maintenance 4.0 pourrait contribuer à fournir l'information nécessaire à l'évaluation durable de la maintenance. Il ajoute que la maintenance 4.0 pourrait devenir un

élément central pour la poursuite d'une maintenance durable et de la gestion du cycle de vie des actifs.

Il est presque impossible de trouver des solutions aux problèmes de maintenance durable sans prendre en considération la technologie. En effet, le développement de nouveaux équipements et nouvelles technologies affecte considérablement la façon de planifier et d'implémenter les opérations de maintenance. L'intelligence et la connectivité permettent de développer des capacités et des fonctions sur les nouvelles machines, à savoir : le monitoring, le contrôle, l'amélioration et l'autonomie. L'intégration de la maintenance intelligente (maintenance 4.0) va donc permettre d'incorporer les nouvelles technologies dans le planning, l'implémentation, le monitoring et l'analyse des processus de maintenance.

La maintenance 4.0 est une maintenance numérique qui est essentiellement basée sur des méthodes analytiques avancées et des données massives issues :

- Des conditions d'usage,
- De l'environnement,
- De l'historique de maintenance,
- Des équipements similaires ailleurs et tout autre aspect qui peut être associé à la performance des actifs.

La maintenance n'est rien sans l'analyse des données et c'est la maintenance prescriptive qui permet de valoriser les données en recommandations d'actions de maintenance. La figure 1.4 nous montre les objectifs, les valeurs et le niveau de complexité de chaque type de maintenance. La figure 1.5 nous montre le niveau d'exploitation des données et statiques en fonction du niveau de maintenance, la fiabilité et les opérations à ces niveaux de maintenance. Le tableau 1.4 nous renseigne sur comment ces données peuvent être collectées, les ressources qu'on pourrait utiliser pour le faire et le type de données qu'elles utilisent.

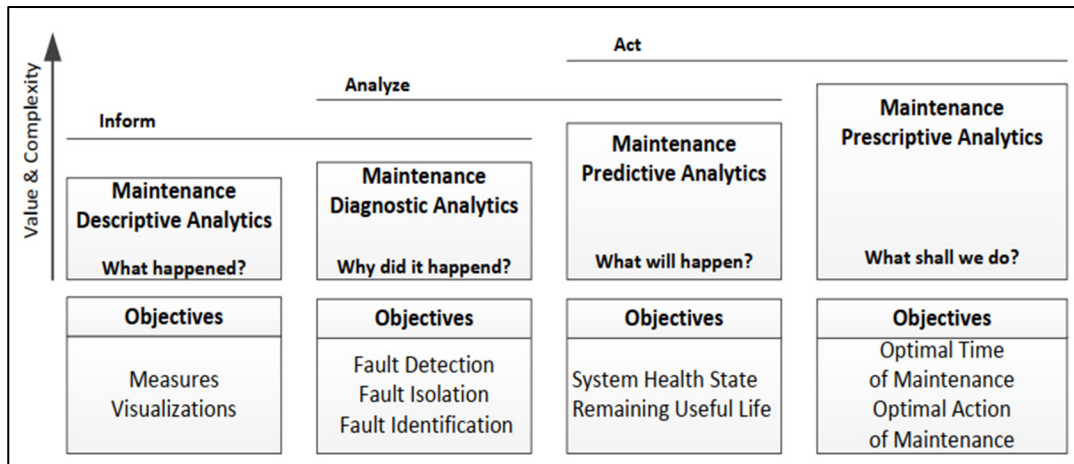


Figure 1.4 Phases chronologiques de la Maintenance Analytics
Tiré de Małgorzata Jasiulewicz - Kaczmarek, Arkadiusz Gola (2019, p. 93)

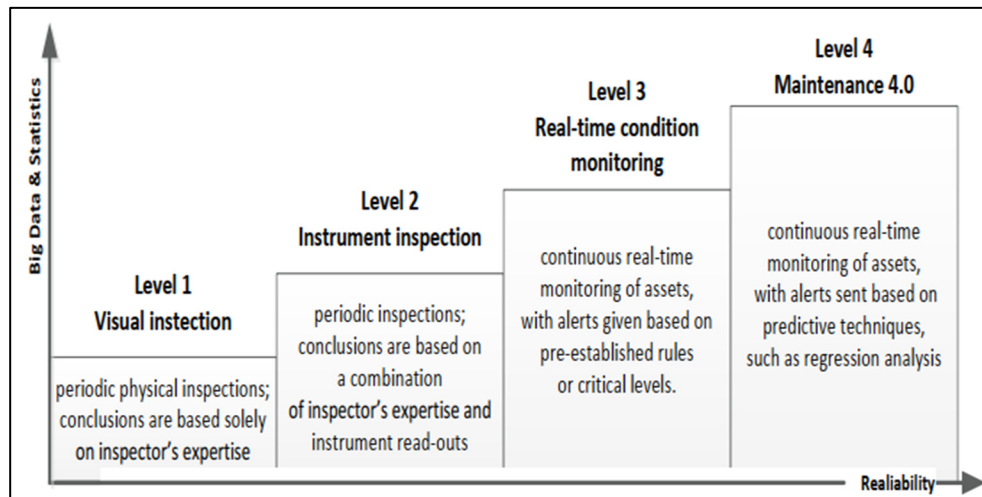


Figure 1.5 Matrice de maturité de la maintenance prédictive
Tiré de Małgorzata Jasiulewicz - Kaczmarek, Arkadiusz Gola (2019, p. 94)

Tableau 1.1 Matrice de maturité de la maintenance prédictive
Tiré de Małgorzata Jasiulewicz - Kaczmarek, Arkadiusz Gola (2019, p. 94)

Content (the types of data they use)	- periodic inspection (physical) - checklist - paper recording	- periodic inspection (physical) - instruments - digital recording	- continuous inspection (remote) - sensor - digital recording	- continuous inspection (remote) - sensor and other data - digital recording
Processes (how that data is collected)	- paper based condition data - multiple inspection points	- digital condition data - single inspection points	- digital condition data - multiple inspection points	- digital condition data - multiple inspection points - digital environmet data - digital maintenance history
IT (which hardware and software tools are used)	- MS Excel / MS Access	- embedded instrument software	- condition monitoring software - condition database	- condition monitoring software - big data platform - wifi network - statistical software

Un des autres aspects de la maintenance 4.0 dont on ne parle pas beaucoup, c'est la réalité augmentée et l'imagerie virtuel 3D qui est conçue grâce à la programmation. Cette réalité augmentée peut servir d'outil de formation pour le montage et démontage des pièces dans une salle de radio par exemple os/poumons en biomédical par exemple. Néanmoins elle peut servir aussi d'outils d'aide à la maintenance en simulant les instructions graphiques à distance qu'on aimerait donner au technicien qui se trouve sur les actifs à maintenir. Selon l'article (Rødseth H, 2017) la maintenance 4.0 pourrait réduire le cout de la maintenance de 10 à 40%, diminuer le temps d'arrêt des machines de 30 à 50% et augmenter leur durée de vie de 20 à 40%.

1.2.3 Les techniques de maintenance, la maintenance 4.0 et l'industrie 4.0

La maintenance est reliée et indispensable à la production d'une organisation. Une de ses caractéristiques est qu'elle inclut tous les groupes de personnes et va au-delà de la limite d'un département traditionnel. Elle peut être définie comme une combinaison des activités techniques et administratives requises pour garder opérationnels ou restaurer les équipements, les installations et actifs physiques. Afin de généraliser, l'objectif de la maintenance serait d'atteindre un modèle de fonctionnement convenu au niveau de la sortie, tout en respectant le cout minimum des ressources dans les limites de l'état et de la sécurité du système.

Afin d'être en mesure de soutenir le succès d'une industrie 4.0, la maintenance 4.0, ou plus spécifiquement les réunions de maintenance pour les demandes de l'industrie 4.0, doivent avoir les objectifs suivants (Al-Najjar, 2015) :

- Maintenir une réactivité rapide pour répondre à la dynamique et aux des changements rapides au niveau de conditions d'opérations et de l'environnement.
- Maintenir la qualité des machines à un cout faible, ce qui rend la maintenance et le processus de production plus rentable.
- Atteindre une haute qualité des performances et de production des machines.

En complément avec ce qui a été mentionné ci-dessus, les activités de maintenance 4.0 pourraient exercer une influence élevée au niveau de l'efficacité de la compagnie. Cette influence peut se traduire par ses interactions internes et son impact dans différents aspects et espaces du travail, comme le cout de la production, la consommation d'énergie, la sécurité, la livraison à temps et l'environnement de travail (Al-Najjar, 2007), (Maletic, 2014). Aussi, une maintenance efficace et fiable n'augmente pas seulement la profitabilité, mais améliore aussi les performances globales de l'entreprise. (Luca Silvestri a, 2020)

À nos jours la plupart des organisations se tournent vers un modèle de fonctionnement de maintenance 4.0 et les tâches nécessaires de maintenance à accomplir afin de répondre aux besoins de l'industrie 4.0 sont les suivantes :

- La détection d'anomalies : On devrait être capable de détecter les anomalies des conditions des actifs, de la performance du processus de production et des anomalies au niveau de la consommation d'énergie, de l'environnement de travail et des conditions d'opérations (exemple : vitesse, chargement, température, etc.)
- Le diagnostic, le pronostic et la prédiction : On devrait être capable d'identifier et de localiser les causes et les dégâts, d'estimer les dommages sévères et suivre leur développement et prédire et aussi évaluer la durée de vie restante des actifs.
- La planification de la maintenance : On doit être capable de suggérer le temps de maintenance le plus profitable pour la maintenance associée aux ressources et aux compétences requises. Aussi elle devrait être capable de générer automatiquement les

actions de maintenance, afin de synchroniser les actions de maintenance avec la production.

- L'exécution de la maintenance : On devrait être capable de conduire automatiquement les actions de maintenance afin d'accomplir une réparation autonome des actifs, pour des réparations qui peuvent être effectuées sans l'intervention d'un technicien.
- Le temps court de réparation : On devrait être capable de communiquer grâce à la réalité augmentée afin d'assister les ingénieurs dans l'accomplissement des actions de maintenance appropriées, fiables et dans un temps d'exécution court.
- Un apprentissage autonome : On devrait être capable d'apprendre des données passées, afin de continuellement améliorer et optimiser les actions et les décisions de maintenance.
- Une présentation des données : On doit être capable de visualiser à temps réel les informations et les résultats des analyses du diagnostic, de la prédiction, de la progression des travaux de maintenance, des tâches complétées et en attente.

Afin d'être en mesure de réaliser une maintenance 4.0 respectant les conditions ci-dessus dans un environnement industriel, il devrait posséder les qualités suivantes :

- Une communication à temps réel
- Une décentralisation des activités de production
- Une détection des problèmes
- Une automatisation
- Un affichage à temps réel
- Une intelligence
- Une bonne rentabilité
- Une adaptabilité
- Un suivi digital de la production
- Une prise décisions précise
- Une considération des statistiques de production

L'article (Basim Al-Najjar, 2018) nous révèle une des façons intéressantes de combiner quelques-unes des pratiques de maintenance couramment utilisées avec les caractéristiques de

maintenance 4.0. Ainsi on serait capable d'attribuer un score à chacune de techniques de maintenance et dire si son modèle de fonctionnement serait le plus en adéquation avec une migration vers un modèle de maintenance 4.0.

Tableau 1.2 Estimation linguistique de l'adéquation des techniques d'entretien les plus populaires par rapport aux fonctionnalités de Maintenance 4.0
Tiré de Małgorzata Jasiulewicz - Kaczmarek, Arkadiusz Gola (2019, p. 94)

		Maintenance techniques (alternatives)				
No.	Features (criteria; abilities of Maintenance 4.0)	FBM	PM	CBM	TQMai n	TPM
1	Real-time communication	none	Low	middle	high	middl e
2	Decentralization	high	high	high	high	high
3	Damage detection	none	none	middle	high	none
4	Automation	none	Low	middle	middle	low
5	Real-time data presentation	none	none	low	high	none
6	Intelligence	none	none	middle	high	none
7	Cost effective	low	midd le	high	high	middl e
8	Scalable	high	Low	middle	high	low
9	Monitoring production process	none	none	low	high	none
10	Accurate decisions	none	Low	high	high	middl e
11	Digitalized	low	midd le	high	high	middl e
12	Production KPIs consideration	none	Low	low	high	low

Tableau 1.3 Valeurs numériques de Décision multi-attributs Fabrication
Tiré de Małgorzata Jasiulewicz - Kaczmarek, Arkadiusz Gola (2019, p. 94)

No.	Features (criteria; abilities of maintenance techniques)	Maintenance techniques (alternatives)				
		FBM	PM	CBM	TQMain	TPM
1	Real-time communication	0	3	6	9	6
2	Decentralization	9	9	9	9	9
3	Damage detection	0	0	6	9	0
4	Automation	0	3	6	6	3
5	Real-time data presentation	0	0	3	9	0
6	Intelligence	0	0	6	9	0
7	Cost effective	3	6	9	9	6
8	Scalable	9	3	6	9	3
9	Monitoring production process	0	0	3	9	0
10	Accurate decisions	0	3	9	9	6
11	Digitalized	3	6	9	9	6
12	Production KPIs consideration	0	3		9	3
				3		
	S_m	24	36	75	105	42

Les deux tableaux 1.2 et 1.3 ci-dessus nous montrent les caractéristiques de la maintenance 4.0, les techniques de maintenance à savoir : *FBM* (*Failure Based Maintenance*), *PM* (*Préventive Maintenance*), *CBM* (*Condition Based Maintenance*), *TQMain* (*Total Quality Maintenance*), *TPM* (*Total Productive Maintenance*). À chacune des caractéristiques de la maintenance 4.0 on leur a attribué un niveau d'importance (None=0, Low=3, Middle=6, high=9) dans les techniques de maintenance couramment utilisées, afin de déterminer avec le tableau de droite leur score total et identifier laquelle des techniques serait la plus compatible

avec un modèle de maintenance 4.0. Comme on le peut le voir, le score le plus intéressant c'est le *TQM* qui est une technique basée beaucoup plus sur la qualité.

1.2.4 L'importance de réunir le nouveau et l'ancien en maintenance

1.2.4.1 La gestion de la maintenance et les nouvelles technologies

La maintenance doit évoluer en même temps que l'évolution technologique. L'évolution rapide de la numérisation pourrait créer un risque de se concentrer sur les changements techniques et le développement des compétences. Les concepts et la gestion de la maintenance devraient également être développés, mis en œuvre et améliorés, en même temps que le développement technologique afin d'obtenir une efficacité totale.

Malgré le fait que des nouvelles technologies et méthodes de management sont développées pour la maintenance, il est important de continuer à garder quelques anciennes habitudes de maintenance. L'idéal serait de combiner nouvelles et anciennes méthodes de fonctionnement afin de s'assurer qu'il y a toujours une intervention humaine pour s'assurer que les actions telles : entretien, nettoyage sont réalisées à temps pour augmenter la durée de temps entre l'installation des machines et l'apparition des nouvelles défaillances.

1.2.4.2 Les technologies de la maintenance 4.0 dans un contexte manufacturier

Il est presque impossible de rechercher des solutions adaptées à un modèle de maintenance 4.0 sans considérer les technologies comme partie intégrante de ce développement. Un des domaines d'application de l'industrie 4.0, c'est la maintenance 4.0 qui se définit comme un apprentissage automatique et des systèmes intelligents qui prédisent les diagnostics de maintenance et déclenchent les actions des maintenances. La maintenance 4.0 se repose essentiellement sur des techniques analytiques avancées utilisant un grand volume de données en lien avec les conditions techniques, l'usage, l'environnement, l'historique des maintenances, d'autres équipements similaires ailleurs, finalement tout ce qui pourrait être corrélé à la performance des actifs.

Au cours des années précédentes jusqu'à maintenant, la maintenance a considérablement évolué, non pas seulement à cause de l'évolution de la technologie, mais aussi à cause des nouvelles exigences du marché. La maintenance a beaucoup évolué en passant par une fonction réactive, devenant une approche préventive, pour ensuite devenir un processus allégé, puis un processus vert. Aujourd'hui elle doit être considérée comme un processus qui doit être géré selon des perspectives durables.

1.4 Gestion de la transition numérique vers un modèle de maintenance 4.0

1.1.4 Transformation numérique

Cette section décrit les éléments importants à prendre en considération de nos jours lorsqu'on veut effectuer la transformation numérique d'une organisation ou lorsqu'on veut qu'elle soit plus agile. Cette transformation numérique passe par une maîtrise de la structure de l'organisation qui est constituée de quatre éléments structurels à savoir :

- Les ressources,
- Le système d'information,
- La culture de la structure,
- L'organisation de la structure.

Ces quatre éléments structurels sont connectés entre eux à partir des six niveaux de développement d'une industrie 4.0 qui sont appelés des niveaux de maturités. Les niveaux de maturité de chacun des quatre éléments structurels seront ensuite déterminés en fonction de leur évolution par rapport à deux principes qui se feront grâce au développement de certaines capacités. Figure 1.6 (Boos, 2011)

Le premier principe signifie qu'on devrait posséder les capacités digitales nécessaires de façon pour effectuer un travail basé sur des données interprétées afin de justifier des décisions. Les employés doivent identifier les sources de données et les techniques pour les exploiter. Parmi ces capacités, il serait aussi important de posséder et d'implémenter les technologies nécessaires pour transformer ces données en informations. Figure 1.7

Le deuxième principe signifie qu'on devrait avoir une communication structurée et une interface qui est basée sur les tâches à accomplir. Il serait important d'avoir une vue d'ensemble de toutes les pièces d'informations provenant de l'exploitation des données avant de prendre des décisions. Pour que les données soient suffisantes et échangées de façon la plus structurée possible, il serait nécessaire d'avoir une interface appropriée et un accord unanime sur le processus de communication. Figure 1.7

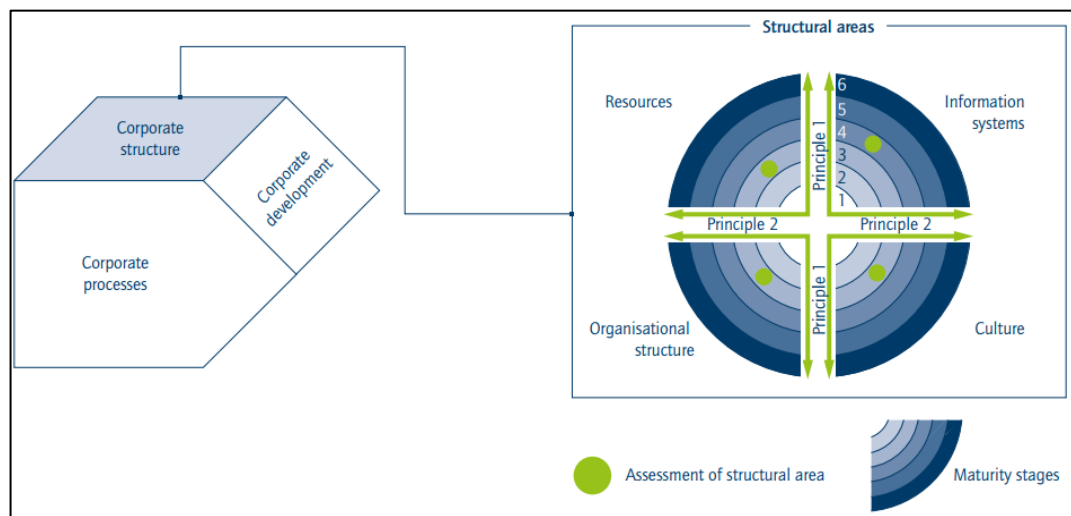


Figure 1.6 Réseau structurel
Tirée de Boos, W./Völker and M./Schuh, G (2011, p. 20)

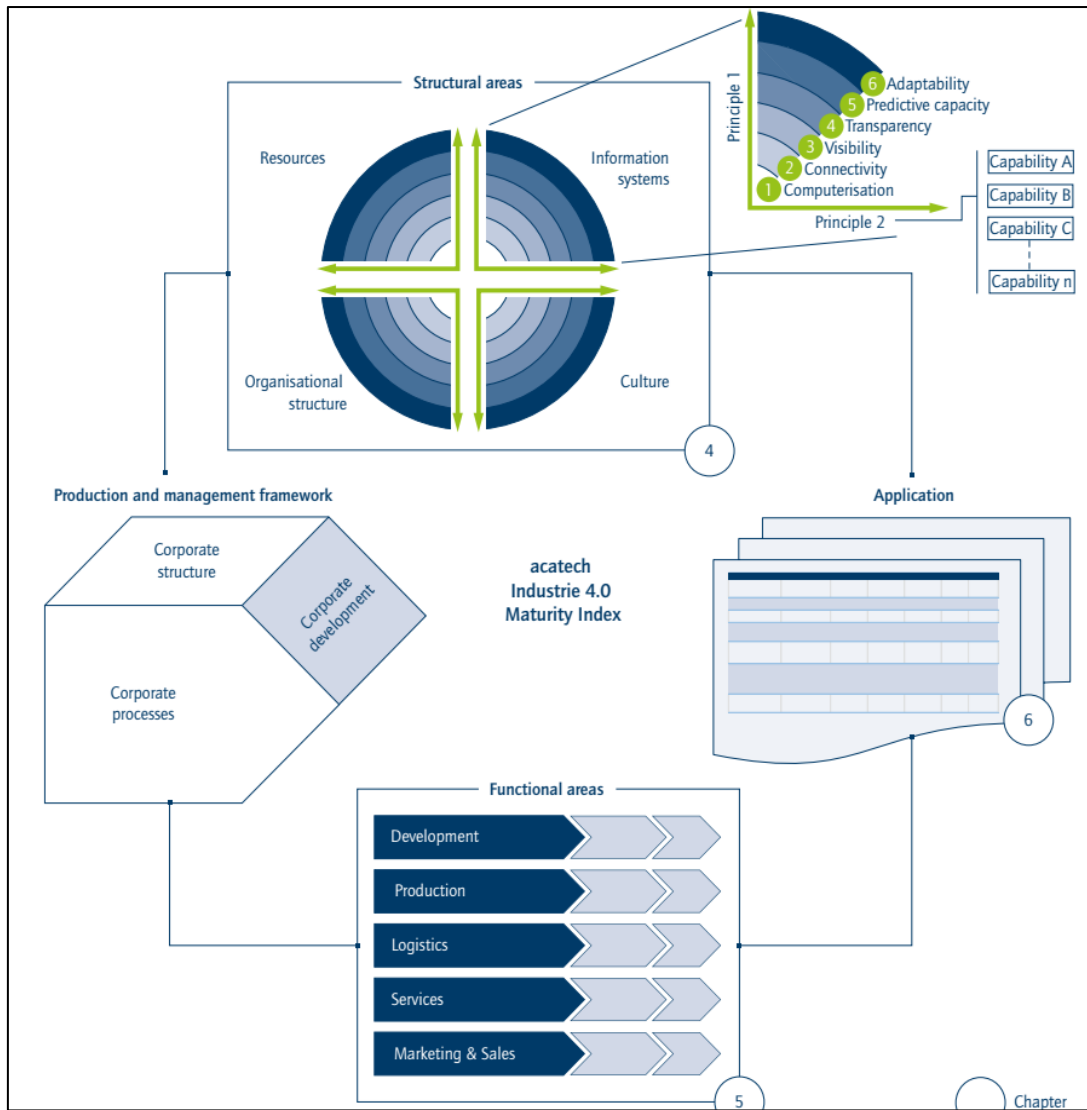


Figure 1.7 Modélisation de l'indice de maturité Acatech Industrie 4.0
 Tirée de Boos, W./Völker and M./Schuh, G (2011, p. 19)

1.4.1.1 Les ressources

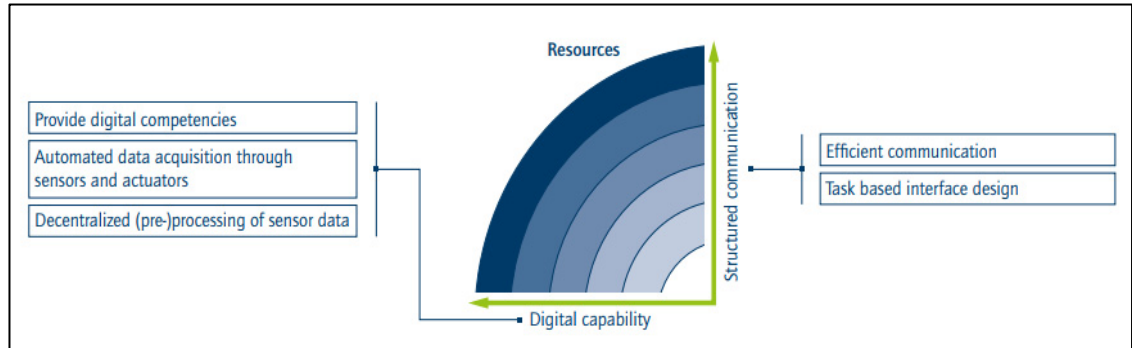


Figure 1.8 Capacités du domaine structurel « ressources »
Tirée de Boos, W./Völker and M./Schuh, G (2011, p. 21)

Le contexte de recherche du livre « *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies* » fait allusion aux ressources physiques et tangibles (le personnel, les équipements, les outils, le matériel et le produit fini). L'ensemble de ces ressources constituent la capacité digitale d'une organisation et une fois interconnectée, ils nous permettent d'avoir une communication structurée adaptée. Figure 1.8

i. La Capacité digitale

Afin d'attendre la capacité digitale conseillée lors de la transformation numérique, les aspects suivants doivent être pris en considération :

A. La compétence digitale du personnel

Tout personnel de l'organisation doit recevoir une formation de base de l'ensemble des processus de traitement existant pendant et après la numérisation. L'implication du personnel dans le processus d'innovation leur permettra d'avoir une vue d'ensemble et d'être plus conscients des problèmes qu'une erreur dans l'accomplissement de leurs tâches pourrait créer à l'organisation.

Une fois que la transition digitale aurait été effectuée, il serait important que le personnel puisse avoir une vue d'ensemble et un accès sécurisé aux données, afin de pouvoir facilement remarquer les erreurs potentielles et de mieux les interpréter. Bien que l'accès aux données par tout le personnel pourrait considérablement améliorer leur prise de décision, elles constituent tout même la propriété intellectuelle de l'organisation et nécessitent que leur accès soit sécurisé. (Boos, 2011)

B. L'acquisition de données à partir des capteurs et des actionneurs

Afin d'être en mesure de créer un espace intelligent qui permettrait de faciliter et d'analyser l'interaction des ressources d'une organisation, il serait nécessaire de pouvoir effectuer une acquisition des données sur les équipements grâce aux capteurs et aux actionneurs. L'amélioration des ressources technologiques des équipements passe par la mise à jour de ses composantes mécaniques grâce aux systèmes embarqués, aux capteurs, aux actionneurs, aux systèmes d'information et à l'interconnexion des couches de communication.

L'acquisition des données ne devrait pas servir uniquement pour créer une boucle de contrôle locale, mais devrait aussi servir à créer ou à améliorer l'interaction entre toutes les ressources. Elle permettrait ainsi d'observer la stabilité d'un processus technique et les éventuels changements. Il serait important d'enregistrer et d'exploiter les bonnes données afin d'obtenir une meilleure ombre digitale de chaque équipement. (Boos, 2011)

C. Le prétraitement décentralisé des données des capteurs

Les systèmes embarqués font partie des éléments clés permettant l'amélioration de la décentralisation et le prétraitement. Grâce aux actionneurs, aux capteurs et aux systèmes embarqués, il est possible d'obtenir des petits modules reliés à la ressource technique sur lesquels on peut directement effectuer du prétraitement.

La compétence digitale du personnel est un aspect important à prendre en considération dans ces ressources, car c'est grâce à leurs compétences qu'il sera possible de tirer profit des informations ou des données possédées. Une meilleure gestion des ressources pourrait réduire le temps de latence entre les données et les actions. Il serait donc important de se rassurer

qu'une organisation possède une interface entre ses ressources dans le monde physique et digital. Ceci permettrait d'avoir une vue d'ensemble dans le monde numérique et faciliterait le processus d'apprentissage afin d'accroître leur agilité. Figure 1.9

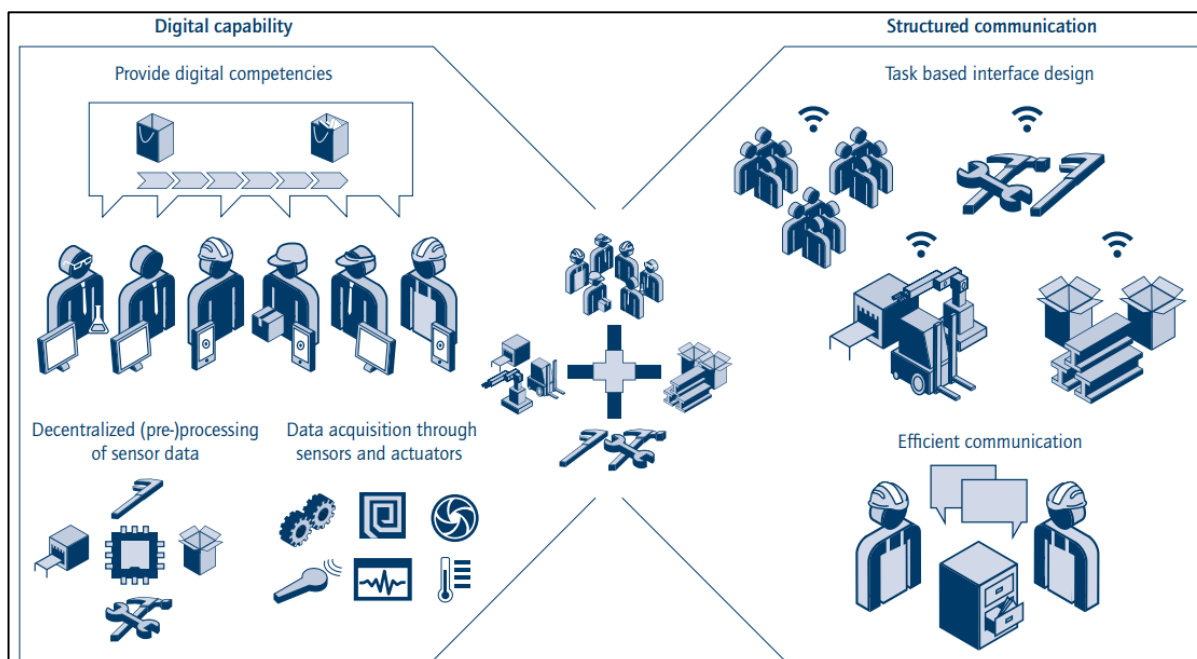


Figure 1.9 Capacités recommandées dans les ressources du domaine structurel
Tirée de Afshari, L./Gibson, P (2016, p. 23)

D. Communication structurée

La centralisation des décisions est une méthode de travail qui devient moins efficace lorsque leur nombre devient de plus en plus croissant et que le niveau de complexité augmente. Il serait donc plus intéressant d'avoir un système décentralisé surveillé ou toutes parties se réunissent lorsqu'il est question de prendre une décision centrale.

La communication entre les employés doit être traçable, documentée, sans répétition. La traçabilité peut être réalisée grâce à un système de marquage automatisé et lorsqu'il est accessible en temps réel grâce aux applications. Afin de pouvoir éviter la répétition et d'avoir une bonne documentation, il serait judicieux de centraliser les données et les informations dans

un seul serveur. Une fois les données centralisées, il serait intelligent de donner un accès à chacun des employés qui sera retraçable grâce à des signatures uniques. Figure 1.9 (Günther Schuh, 2017)

E. Conception d'interface basée sur les tâches

L'interface basée sur les tâches permet l'identification et la visualisation simple des technologies, favorisant ainsi la transmission d'informations du monde digitale vers le monde réel. Ces interfaces rendent aussi possible l'interaction entre différents types de ressources technologiques.

1.4.1.2 Systèmes d'information

Ce sont des systèmes dans lesquels les informations sont stockées à des fins économiques ou de qualité de service par les personnes, les technologies de l'information et de la communication. Grâce à ces systèmes, il est possible de préparer, traiter, sauvegarder et transférer des données et informations. Les systèmes d'information peuvent être considérés comme un outil primordial pour une organisation, car c'est grâce à eux qu'il est possible d'exploiter les données et les informations pour prendre des décisions à temps réel.

La majorité des organisations de nos jours n'arrivent toujours pas à exploiter leurs données et informations afin de supporter leurs décisions, pour ces deux raisons :

- Elles possèdent des données sous des formes ou des formats non exploitables et difficilement interprétables par les employés.
- Elles ne possèdent pas un système centralisé qui donne accès aux données aux informations à tous les niveaux de l'entreprise et permet à tous les employés d'utiliser les mêmes données.

L'implémentation d'un système d'information adéquat passe les deux grandes étapes suivantes :

i. Le traitement d'information par autoapprentissage

Il consiste à collecter et à accumuler les données qui seront traitées pour obtenir de l'information qui sera ensuite mise à la disposition des employés. Afin de rendre possible l'autoapprentissage, il faudrait passer par les trois étapes suivantes :

A. Une analyse automatisée des données

Le traitement des données doit être automatisé et à temps réel. Ceci peut être possible grâce à une agrégation des données à temps réel provenant de différentes sources et permettant de mettre en évidence la notion de causalité. Le flux de données doit être surveillé à temps réel afin de pouvoir en tirer des connaissances provenant qui y sont extraites et qui serviront à aider les employés à prendre des décisions. Grâce à un traitement automatisé des données, il est possible de prédire le déroulement des futurs événements basés sur des expériences déjà analysées. (Bauernhansel, 2016)

B. Une production des informations contextualisées

La production des informations contextualisées permet l'utilisation des données interprétées pour faciliter la prise de décision. Cette contextualisation passe par le fait qu'on produise grâce à une logistique efficace et efficace des bonnes informations, au bon endroit, au bon moment, de bonnes qualités, qui seront ensuite acheminées vers les bonnes personnes. Les informations doivent être triées à la source de sorte que l'employé reçoive uniquement les informations nécessaires pour accomplir sa tâche. (Bauernhansel, 2016)

C. Une réalisation d'interfaces utilisateurs spécifiques aux tâches

L'interface utilisateur doit délivrer des informations aux utilisateurs en fonction de leurs compétences. Le type de contenu produit à destination de chaque employé doit être fonction de ses compétences et de ses tâches à accomplir afin qu'il soit aisé pour eux de les interpréter.

D. Une installation des infrastructures informatiques résilientes et mise en œuvre d'un stockage de données basé sur la situation.

Les installations informatiques doivent être robustes afin de pouvoir supporter la capture, le transfert, la sauvegarde, le traitement et la garantie de la fonctionnalité des systèmes. Ces installations doivent permettre une mise à jour continue adaptée en fonction des nouveaux besoins et des nouvelles recommandations. Il doit pouvoir aussi garantir une utilisation à long terme et être accessible en un temps raisonnable. (Bauernhansel, 2016)

ii. L'intégration des systèmes d'information

L'intégration des systèmes d'information est une opération qui consiste à se rassurer de l'utilisation des données communes à travers la chaîne de valeur, afin de faciliter leur exploitation et l'accès aux informations qu'elles contiennent. Cette intégration passe par les étapes suivantes :

A. Une intégration verticale et horizontale

Le but est d'intégrer l'information afin que ce qui en découle soit directement relié à la production, au processus d'instruction, aux informations client et au travail en général. Cette intégration permet à tous les utilisateurs d'avoir accès au même jeu de données et de ne pas avoir des données redondantes. Figure 1.10

B. Une standardisation des interfaces

À défaut d'avoir un stockage de données central, une des façons d'avoir une source unique de données est de connecter tous les systèmes d'information à une interface de données standard. Il est important d'utiliser une interface standard, modulable et ouverte à toute application de l'organisation. (Günther Schuh, 2017) Figure 1.10

C. Une implémentation de la gouvernance des données

Elle procure à l'organisation un accompagnement pour le traitement, le stockage, le management et l'exploitation des données de qualité dans la compagnie. Elle permet de ne pas accumuler des données de mauvaise qualité qui pourraient compromettre les décisions prises basées sur des données. La gouvernance des données devrait permettre aussi l'exécution automatique du prétraitement (identification, la standardisation, la suppression des doublons, etc.) des données. (Günther Schuh, 2017) Figure 1.10

D. Une sécurisation de l'accès aux des technologies de l'information

La sécurisation doit couvrir les activités de l'administration, l'identification et l'authentification des utilisateurs, le système de validation de la santé et le flux des données. Elle permet de prévenir des risques des cyberattaques afin d'éviter les potentiels dégâts qu'elles pourraient causer à l'intégration des données. Figure 1.10

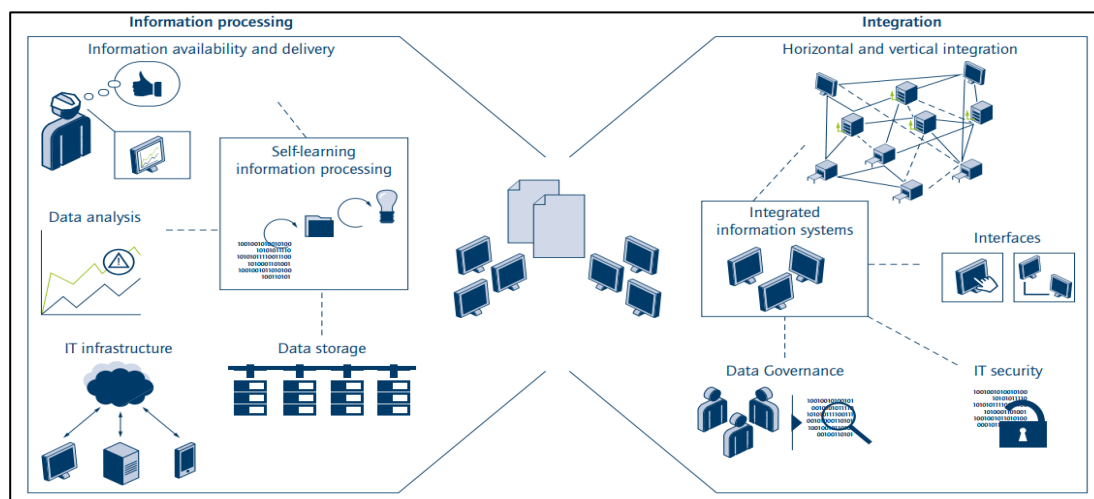


Figure 1.10 Capacités requises dans le système d'information du domaine structurel
Tirée de Günther Schuh (2017, P. 28)

1.4.1.3 Organisation de la structure

La transformation d'une organisation passe par les éléments de technologies décrits ci-dessus, mais son implémentation nécessite une bonne organisation structurale. Cette organisation fait

référence au processus opérationnel et structurel interne, mais aussi à position dans le réseau de valeur. Elle est guidée par deux principes :

i. L'organisation interne organique

Cette organisation s'éloigne du contexte de mécanisation et met plutôt l'accent sur les responsabilités individuelles. Elle est composée des éléments suivants :

A. La flexibilité de la communauté

Une organisation agile dans un environnement dynamique devrait pouvoir permettre la communication, la collaboration et l'échange de compétences entre ses différents départements. Cette collaboration des employés de départements différents devrait pouvoir nous assurer qu'ils suivent tous la même direction et poursuivent un objectif commun. Figure 1.19

B. Les bonnes décisions de management

Un des avantages de la transformation numérique et l'industrie 4.0, c'est la disponibilité et l'accès à l'information. Le processus de transformation numérique passe aussi par l'amélioration des processus de prise de décisions. Avoir un des modèles de prises de décisions centralisé ou décentralisé peut avoir chacun des avantages et des inconvénients. Un des avantages et inconvénients majeurs c'est le coût que la communication d'une information ou d'une décision peut engendrer. L'idéal pour une organisation serait donc d'adopter une stratégie qui installerait le bon équilibre entre les prises de décisions centralisées et décentralisées tout en se rassurant qu'elles suivent les objectifs généraux communs de la compagnie. Figure 1.11

C. Le but du système de motivation

Une organisation ne devrait pas mettre en place un système de récompenses unidimensionnel, mais plutôt multidimensionnel. Ce système multidimensionnel permettrait à un employé de se démarquer dans un domaine même s'il n'exceller pas dans un autre. Lors de la transformation numérique, il est important de se rassurer que le système de récompense du travail des

employés ne repose pas uniquement sur la rémunération, mais aussi sur les objectifs atteints. Il est important de toujours penser à mettre en place un système qui permettrait à l'employé de se sentir confiant, en sécurité et valorisé. Figure 1.11 (Günther Schuh, 2017)

D. Le management agile

La transformation numérique devrait permettre à une organisation d'installer un fonctionnement qui n'est pas rigide, mais plutôt dynamique. Cette façon de procéder impliquerait que le management d'une organisation puisse s'appuyer sur des données qui sont en constante évolution et qui intègrent les retours et suggestions des clients ou utilisateurs des produits. Figure 1.11

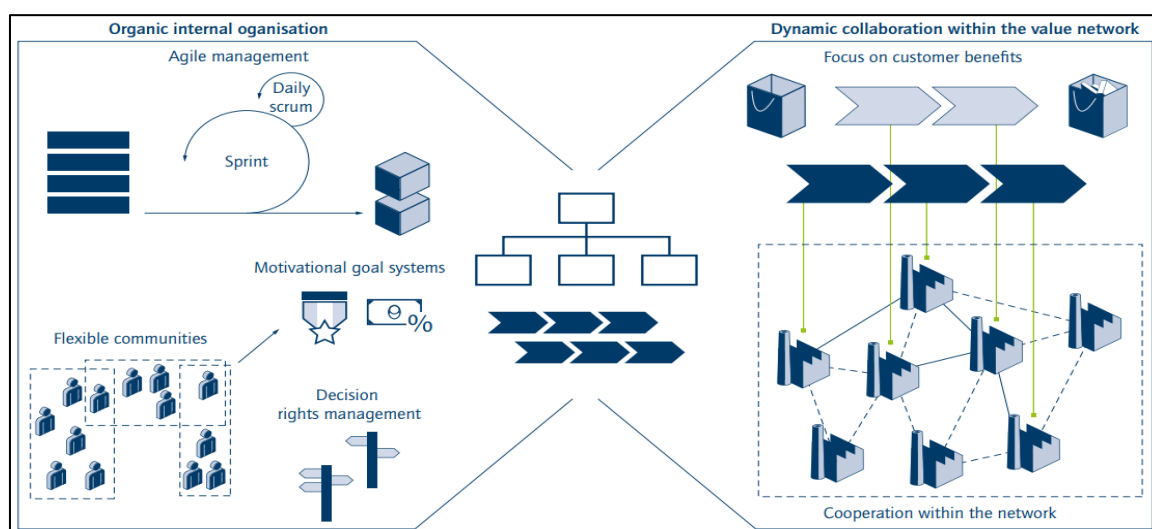


Figure 1.11 Capacités requises dans l'organisation de la structure du domaine structurel
Tirée de Günther Schuh (2017, P. 31)

ii. Une collaboration automatique et dynamique au sein du réseau de valeur

Un échange d'informations automatisées et transparentes contribue au processus de transformation numérique d'organisation et permet d'établir une coopération dynamique et une transparence vis-à-vis du marché. Elle permet d'éliminer les processus manuels, d'améliorer la visibilité opérationnelle, l'échange des biens et des services. Afin de rendre possible cette

collaboration dans le processus de transformation numérique, il est important d'effectuer les actions suivantes :

A. Une focalisation sur les avantages du consommateur

La collaboration automatique et dynamique entre les organisations doit se focaliser sur le partage transparent des données clients permettant ainsi d'améliorer les produits et la qualité des services. Il est important que chaque organisation puisse faire la différence entre leur besoin, l'innovation et les actions entreprises pour satisfaire les besoins du consommateur. Alimenter de façon automatique et dynamique un réseau commun de données clients permettrait aux organisations d'évaluer continuellement leurs compétences et de les adapter en fonction des circonstances. Figure 1.11

B. Une coopération au sein du réseau

Une organisation qui est dans un processus de transformation numérique devrait mettre en place un système qui lui permet de partager de façon automatique et efficace des données avec les autres organisations. Cette coopération permet parfois d'externaliser les besoins des organisations et favorise une collaboration qui leur permet d'atteindre rapidement leurs objectifs et les exigences du marché. Dans cette coopération, il est également important pour les organisations de développer des mécanismes qui leur permettraient de construire une relation de confiance même avec les nouveaux partenaires. Le management des données digitales est important afin de s'assurer que les données partagées ne soient pas exploitées à des fins autres que ceux de la collaboration. Figure 1.11

1.4.1.4 La culture

Une des façons de pouvoir assurer la mise en œuvre d'une nouvelle politique de gestion dans une organisation c'est de changer la culture et la mentalité de ses employés. Le même concept peut aussi s'appliquer en ce qui concerne la transformation numérique. Avant d'effectuer les changements technologiques qu'on juge nécessaires pour la transformation de l'organisation, il serait plutôt judicieux d'expliquer aux employés les nouvelles procédures de travail et les compétences qui seront requises pour les appliquer. (Günther Schuh, 2017) Figure 1.12

Les nouvelles technologies qu'on voudrait mettre en place ne doivent pas être considérées comme une contrainte, mais plutôt comme un outil qui leur permettrait de détecter eux-mêmes les nouvelles tâches et de démarrer des actions pertinentes pour les accomplir. La transformation numérique d'une organisation passe d'abord par la transformation de sa culture qu'on pourrait résumer en deux questions :

- Dans quelle mesure les employés sont-ils intéressés à revoir et à adapter leur comportement face à un environnement changeant ?
- Dans quelles mesures les employés pensent-ils que leurs actions devraient être guidées par des connaissances fondées sur des informations provenant des données et des technologies ?

Le changement d'une culture passe par :

i. Le désir de changer

La volonté de changer des employés passe par cinq principaux éléments qui ne doivent pas être pris en compte séparément, mais plutôt dans l'ensemble. Figure 1.12

A. Reconnaître la valeur des erreurs

Les organisations agiles et apprenantes doivent accorder une attention particulière aux erreurs, surtout pendant un processus de transformation numérique. L'approche à ne pas avoir face aux erreurs est de vouloir les éviter et les régler immédiatement lorsqu'elles apparaissent. Les erreurs qui peuvent arriver constituent une opportunité de mieux comprendre certains processus et y révéler les relations de cause à effet qui étaient non perceptibles. L'adoption de cette approche de résolution des erreurs par les employés pourrait être reliée à un début d'acceptation des changements au niveau de la culture. Figure 1.12

B. Être ouvert à l'innovation

L'ouverture à l'innovation nécessite une bonne compréhension des nouvelles technologies et des nouvelles méthodes de travail afin qu'elles soient intégrées de façon à ajouter une plus-value à l'organisation. Les bénéfices de l'innovation ne sont pas toujours perceptibles

immédiatement étant donné qu'il faut du temps aux employés pour s'habituer aux technologies nouvellement déployées. Figure 1.12

C. Un apprentissage et une prise décision basée sur les données

Le désir de changer dans la transformation numérique d'une organisation passe par une prise de décision basée sur les données. La sauvegarde et la surveillance des données à temps réel des procédés et des équipements permettent d'avoir une représentation numérique et de réagir avec efficacité si une erreur ou un problème survient. Les données nous enseignent mieux et permettent d'avoir une analyse meilleure que celle basée sur l'expérience d'une seule personne. Figure 1.12

D. Un développement professionnel continu

La tendance de nos jours dans les organisations est en train d'aller vers des compétences pluridisciplinaires plutôt que des spécialités unies disciplinaires. Avec l'évolution grandissante des technologies et l'internet des objets connectés, l'environnement en industrie change beaucoup. Ceci pousse les organisations à mieux apprécier les compétences des employés qui sont capables et disposent en peu de temps d'aller chercher des compétences dans des domaines nouveaux. Cette aptitude à comprendre comment l'environnement change et à réaliser que les compétences déjà acquises ne seront utiles que pour un temps limité leur permet d'être en mesure de formuler des demandes de formations adéquates. Figure 1.12

E. Façonner le changement

Façonner le changement fait partir des attitudes à avoir pour les employés qui désirent le changement. Une organisation peut être affectée à n'importe quel moment par des événements externes qui nécessiteraient des analyses et des actions correctrices rapides. Il est donc important que ces changements soient initiés par les employés qui sont mieux placés pour interpréter les événements externes. Au lieu de leur faire subir le changement, il serait plutôt judicieux de leur transférer certains pouvoirs de décision afin qu'ils puissent partager leur expertise et faire partir de ceux qui impulsent le changement. (McGrath, 2012)

ii. La collaboration sociale

Le partage rapide des valeurs culturelles dans une organisation passe par la collaboration entre les employés. Elle est rendue possible grâce à trois notions, à savoir :

A. Le style démocratique du leadership

L'un des premiers éléments de réussite d'une collaboration dans une organisation c'est le style de management. La transformation numérique peut certes être un élément important de révolution dans une organisation ; mais si pendant son processus de mise en place on ne se rassure pas d'avoir aussi instauré un bon management, il peut s'avérer être un système inefficace. Étant donné qu'un environnement numérique évolue rapidement, il est important que les décisions soient prises rapidement, mais sans bien sûr affecter la qualité des services. Les employés ne doivent pas être perçus comme des ressources, mais plutôt comme des collaborateurs, leur donnant ainsi une certaine latitude dans les prises de décisions. Il est aussi important que le climat de confiance entre les employés s'installe dans l'organisation afin que les décisions soient prises rapidement, mais aussi mises en œuvre rapidement. (Love, 2001)

B. Une communication ouverte

Afin que les organisations puissent réagir rapidement aux événements imprévus qui peuvent arriver dans un environnement numérique ou un processus de transformation numérique, il est important de partager les informations explicites et implicites avec les employés. Les informations explicites peuvent être acquises à travers des formations, mais les informations implicites nécessitent un réel échange entre des employés qui n'ont pas forcément les mêmes qualifications et les mêmes tâches, mais travaillent en chaînes pour le même objectif. Le partage des informations entre les employés crée une somme de connaissances et permet d'accélérer le processus d'apprentissage dans l'organisation. Figure 1.12

C. Une confiance au processus et au système d'information

L'aspect fonctionnel des technologies et des systèmes dans le processus de transformation numérique n'est pas suffisant pour opérer des changements efficaces. Les employés doivent

être impliqués au début de la construction du système et doivent contribuer à le construire. Ils doivent comprendre les bénéfices de l'utilisation des nouveaux systèmes mis en place et doivent aussi contribuer à apporter leurs remarques afin de les faire évoluer et de les améliorer. L'adoption d'une technologie ou d'un système vient du fait que les employés connaissent l'utiliser, comprennent leur utilité et jugent eux-mêmes leur indispensabilité. Figure 1.12

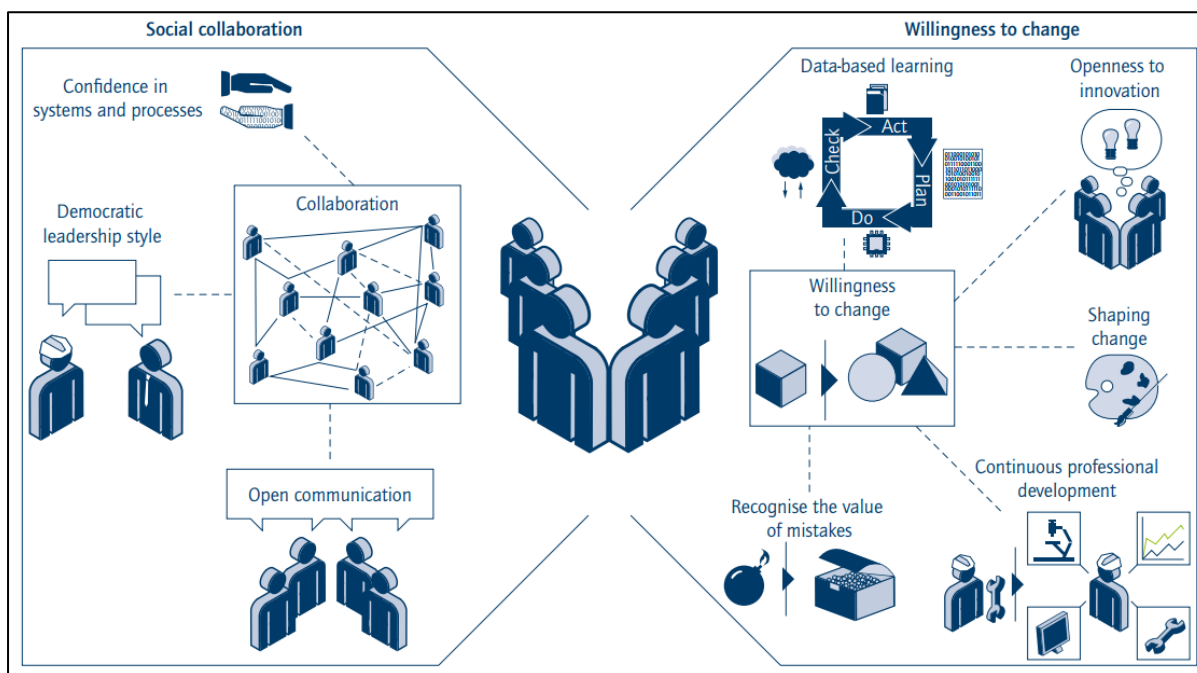


Figure 1.12 Capacités requises dans la culture du domaine structurel
Tirée de Acatech (2016, p. 35)

Une fois qu'on a maîtrisé les points clés de la capacité industrielle, il faut aller regarder les domaines fonctionnels afin de détecter l'indice de maturité de l'organisation. Après avoir déterminé l'alignement des indices de maturité, on serait en mesure de savoir ceux sur lesquels agir et l'ordre dans lesquels il faut le faire afin de les aligner et qu'ils tendent vers un niveau de transformation numérique adéquate pour l'organisation.

Les aspects fonctionnels d'une organisation sont les suivantes :

- Le développement,
- La production,
- La logistique,
- Les services,
- Le marketing et les ventes.

Afin d'accélérer les processus d'adaptation, il est important de comprendre comment le processus de transformation numérique peut exercer une influence sur les différents aspects fonctionnels d'une organisation. L'évaluation du degré de maturité de chaque capacité pourrait être différente en fonction de l'aspect fonctionnel de l'organisation. La compilation des métriques du domaine fonctionnel et celles des capacités de l'organisation permettraient de déterminer son indice de maturité et de constituer des points essentiels sur lesquels s'appuyer pour la gestion du changement. (Günther Schuh, 2017)

1.1.5 Gestion du changement

Dans cette section, nous avons regroupé les capacités industrielles en quatre ensembles afin de simplifier les explications des liens qu'elles pourraient avoir avec la gestion du changement et les domaines fonctionnels.

Les capacités peuvent être affectées différemment dans chaque domaine fonctionnel. L'impact de la transformation numérique sur les aspects fonctionnels peut être positif ou négatif, mais sa réussite dépendra aussi d'une conduite efficace de la gestion du changement. L'appréhension d'un changement passe d'abord par une bonne vision. Une vision est caractérisée par une représentation d'un futur envisagé et d'un futur réalisable en harmonie avec une logique rationaliste. Cette vision, pour être facilement adoptée et arborée, doit être inclusive et mobiliser le plus grand nombre de personnes. Il existe plusieurs types de changement qui se traduisent par :

- Le changement opérationnel qui se traduit au niveau social par un changement permanent qui est là pour durer.
- Le changement stratégique qui se traduit au niveau social par une adaptation évolutive.

- Le changement normatif ou paradigmatique qui se traduit au niveau social par une transformation harmonisée et rigide.

Les étapes à suivre pour opérer des changements dépendent de l'approche choisie. Certaines des approches souvent utilisées sont les suivantes :

i. La première est celle de la thèse d'I Vandangoen-Derumez qui comporte trois phases comportant chacune des sous-étapes de gestion du changement

Ces trois phases et ces sous-phases résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1.4 Tableau récapitulatif des phases et sous-phases de la thèse
D'I Vandangoen-Derumez
Tiré de Pesqueux, Yvon (2020, p. 5)

Thèse	Phases	Sous-phases
Thèse d'I Vandangoen-Derumez sur les phases de gestion du changement.	La maturation	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluation des acquis, • Reconnaissance, • Diagnostique, • Recherche d'informations,
		<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilisation au changement, • Mise en mouvement de l'organisation,
		<ul style="list-style-type: none"> • Définition des grands axes du changement, • Finalisation du projet de changement.
	Le déracinement	<ul style="list-style-type: none"> • Communication et mise en œuvre du projet de changement,
		<ul style="list-style-type: none"> • Génération des nouvelles idées,

Thèse	Phases	Sous-phases
Thèse d'I Vandangoen- Derumez sur les phases de gestion du changement.	Le déracinement	<ul style="list-style-type: none"> • Formation et accompagnement du changement
	L'enracinement	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en cohérence des activités, • Évaluation et bilan des actions engagées,
		<ul style="list-style-type: none"> • Correction des actions engagées,

ii. **La deuxième est celle de G. Salaman & D. Asch (Pesqueux, 2020), elle dépend de la catégorie dans laquelle ils inscrivent le changement et est fondée sur les éléments suivants :**

- Le changement de cultures,
- Le changement par structures,
- La référence aux consultants,
- Le processus de changement,
- Le développement des stratégies de gestion des ressources.

iii. **P. Besson et C. Mathieu (Pesqueux, 2020) précisent que la gestion du changement ne peut être assimilée à un projet, mais plutôt cibler la transformation globale de l'organisation. Il s'agit dans l'ensemble à l'organisation de le planifier en fonction de**

la corrélation, du calendrier et du déploiement global des projets pilotés par les managers supplantés par des experts.

Selon ces trois approches (Pesqueux, 2020), la gestion du changement ne devrait que se focaliser sur la planification stratégique des projets, car les projets sont porteurs des changements qui ne resteront que pour un temps et seront remplacés par d'autres projets. Il serait donc préférable d'aborder les changements d'un point vu organisationnel en se focalisant sur les champs des rationalisations des catégories du changement qui sont :

- Le processus de construction de la stratégie,
- La mutualisation,
- La capitalisation et la standardisation,
- L'expérimentation.

1.1.6 Les origines du changement

Les origines du changement peuvent être internes ou externes à une organisation. Les origines internes du changement peuvent être liées à la technologie, aux services, au personnel, à la gestion, aux méthodes de travail, etc. Les origines externes quant à elles peuvent être liées au climat, à la concurrence, à la population, etc. La plupart des organisations veulent un changement pour avoir ou maintenir leur succès. Afin que ce changement puisse conduire au succès, il serait intéressant de suivre les principes suivants :

- Miser sur les résultats rapides qu'on pourrait obtenir pour évoluer rapidement,
- Avoir un bon plan de suivi et d'accompagnement,
- Établir un sens de priorités et d'urgences,
- Communiquer de façon efficace,
- Mettre le personnel au centre de la réflexion,
- Avoir une bonne gestion et un bon leadership,
- Opérer des changements en partant du bas vers haut, c'est-à-dire en enregistrant les préoccupations des employés du plus bas niveau hiérarchique vers le plus haut.

1.1.7 Critères de succès et d'échecs

Les critères de succès d'un projet sont des ensembles de standards et de principes à partir desquels il est ou pourraient être évalués. Les facteurs de succès d'un projet quant à eux sont des ensembles de circonstances, de faits et d'influences qui contribuent à obtenir des résultats. Deux échelles sont à considérer lorsqu'il s'agit d'évaluer les critères de succès d'un projet, une visibilité « macro » et « micro ». La visibilité « macro » est composée aussi de la « microvisibilité » et elle consiste à regarder tous les aspects du projet au complet pour identifier ses facteurs qui deviendront des critères par la suite.

Deux aspects sont généralement pris en considération pour déterminer le succès d'un projet d'un point de vue macro, à savoir la réalisation et la satisfaction. Les facteurs sont des critères non influençables. Les critères et les facteurs peuvent être des facilitateurs ou des obstacles au succès, mais d'un projet, néanmoins ils ne constituent pas la base du jugement de son échec.

Figure 1.13 (Mohamed, 1999)

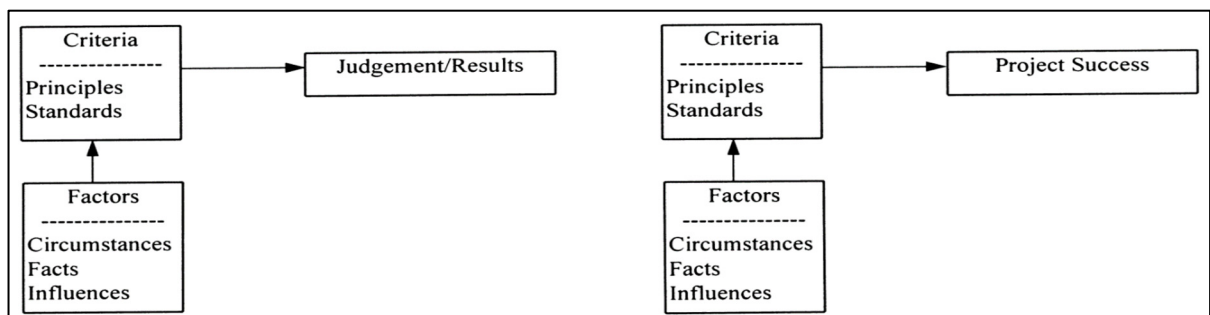


Figure 1.13 Représentation des critères et des facteurs de succès d'un projet ou de production d'un jugement ou d'un résultat
Tirée de Mohamed, C S Lim and M Zain (1999, p. 2)

D'un point de vue macro, un projet pourrait être considéré comme une réussite si son concept initial est réalisé et procure satisfaction. Figure 1.14 (Mohamed, 1999)

Dans la plupart de projets, la réussite de ces concepts dépend très souvent des utilisateurs et des actionnaires, mais il n'est possible de savoir qu'un concept est réalisé que lorsqu'on est au niveau de la phase opérationnelle. Un projet est fait pour combler les besoins des utilisateurs

et des principales personnes concernées, donc s'il remplit cette condition on peut le considérer comme un succès du point de vue macro.

Les deux critères (l'achèvement et la satisfaction) de la réussite d'un projet du point de vue macro sont généralement influencés par des facteurs qui sont le plus souvent jugés par les actionnaires, les propriétaires, les utilisateurs et le public général. Comme on peut le voir sur la Figure 1.14, le premier critère du succès d'un projet du point de vue macro c'est l'achèvement et sa principale condition c'est le facteur temps. Une fois que le projet est achevé, il doit respecter le deuxième critère qui est la satisfaction.

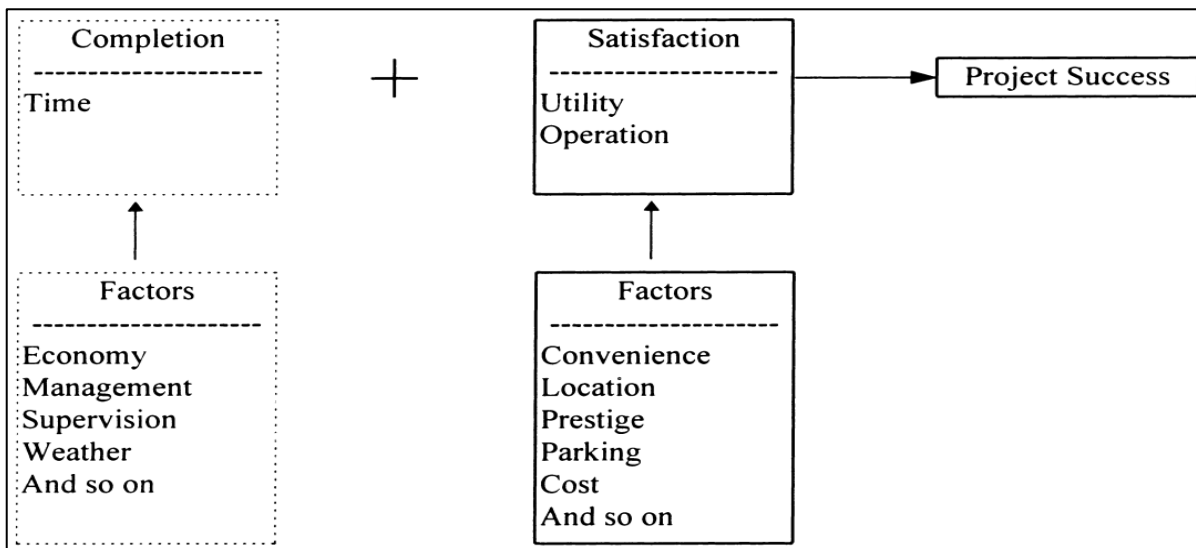


Figure 1.14 Représentation graphique des critères et facteurs de succès d'un projet du point de vue Macro
Tirée de Mohamed, C S Lim and M Zain (1999, p. 2)

Le succès d'un projet du point de vue micro, se juge en observant les réalisations au niveau de ses petites composantes. Ces réalisations s'observent au niveau de la phase de construction du projet et sont souvent confiées à de tiers partis ou encore des sous-traitants. La figure 1.15 ci-dessous nous donne un aperçu des étapes entre les phases conceptuelles et opérationnelles, des phases qui conditionnent l'évaluation du succès d'un projet.

Les facteurs après étude et validation pourraient devenir des critères. Parmi ces facteurs, on pourrait avoir l'étude de faisabilité, les recherches publicitaires, les données de nature diverses, l'expérience, les conditions de sites ; la météo, des erreurs de fabrications, des dommages, des changements de supervisions, d'interfaces, de logistiques, etc. La phase de construction est l'étape ou on peut le plus observer le micro d'un succès d'un projet ; la concrétisation des idées participe à le percevoir comme un succès. C'est dans la phase micro que tous les objectifs d'un projet tels que le temps, le cout, la performance, la sécurité, la qualité des parties contractuelles sont établis et testés. C'est aussi dans la phase de construction que les besoins en temps, couts et qualités sont souvent les plus accrus.

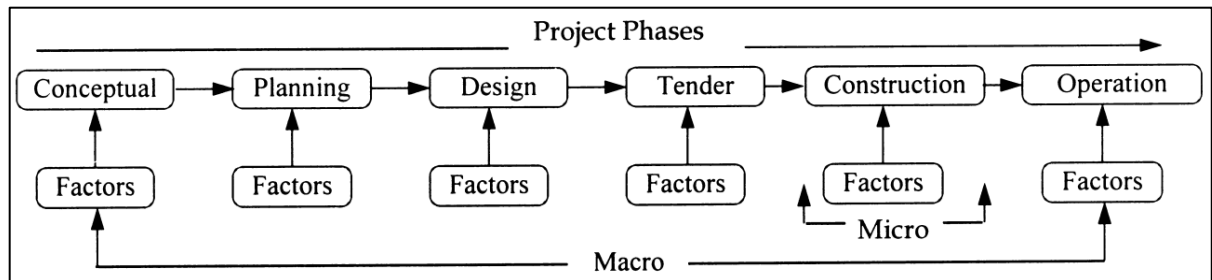


Figure 1.15 Étapes entre les phases conceptuelles et opérationnelles d'un projet
Tirée de Mohamed, C S Lim and M Zain (1999, p. 2)

Généralement se sont les groupes des développeurs et d'entrepreneurs qui interviennent et jugent la réussite d'un projet de vue micro. Les éléments qui influencent le critère d'achèvement d'un projet du point de vue micro sont le temps, le cout, la qualité, la performance, la sécurité. Ce critère d'achèvement du point de vue micro est affecté par les facteurs tels que, la technique, le commerce, la finance, le risque, l'environnement, l'humain, etc.

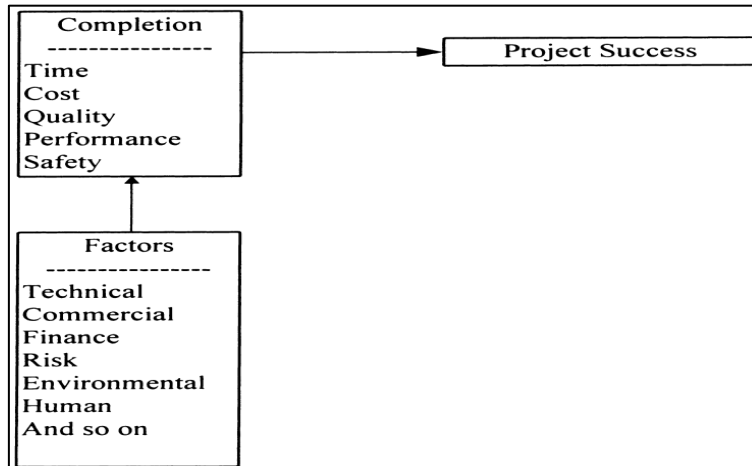


Figure 1.16 Représentation graphique des critères et facteurs de succès d'un projet du point de vue Micro
Tirée de Mohamed, C S Lim and M Zain (1999, p. 2)

Le succès d'un projet doit être finalement observé sous différentes perspectives, à savoir celui, du propriétaire, du développeur, du contractuel, de l'utilisateur, du public général, etc. Cette perspective des différents profils justifie le fait qu'un projet peut être considéré comme un succès par certains et comme un échec par d'autres.

Tout le monde ne peut pas être satisfait lors de la réalisation d'un projet et habituellement les personnes non satisfaites pourraient venir du groupe propriétaire, développeur ou entrepreneur. Chacun de ces groupes considère très souvent qu'un projet a du succès si l'objectif financier est atteint, ceci se produit généralement si aucun des membres de ces groupes n'est utilisateur ou n'est actionnaire.

Les éléments composant les critères d'achèvement d'un projet du point de vue macro et micro sont différents et les facteurs aussi qui les influencent le sont. (Mohamed, 1999)

Des défis tels que l'absence d'exemples de projets de références, les capacités d'analyses limitées, l'incertitude des nouvelles technologies, l'impact du facteur humain, etc., sont des éléments cachés qui influencent le succès de la réalisation d'un projet de transformation numérique et maintenance 4.0. Les critères et facteurs du succès d'un projet du point de vue macro et micro peuvent être variés en fonction du projet. Dans le cas de notre sujet de

rechercher qui concerne la maintenance 4.0 ou maintenance numérique, nous sommes référés à l'article (Afef Saihi, 2022) pour identifier des critères de succès directement reliés à la maintenance numérique. Dans cette revue de littérature, l'auteur a pu identifier 63 facilitateurs et facteurs redondants appartenant à 14 catégories qui seraient à l'origine du succès des projets de transformation et de maintenance numériques. Tableau 1.5

Tableau 1.5 Liste structurée des facilitateurs de maintenance de la transformation numérique
Tiré de Afef Saihi, Mohamed Ben-Daya, Rami As'ad (2022, p. 4)

<u>Category</u>	Factor/Enabler			
Category	Factor/Enabler			
Technology management aspects	Joint implementation of complementary technologies	Data management aspects	Build agile work cycle for the data value chain	
	Interoperability and compatibility of the integrated technologies		Establish a structured process for deciding which data to collect	
	Continuous integration of next generation technology		Data quality and integrity (Accuracy, comprehensiveness, Clarity, applicability, ...)	
	Use of prognostic approaches		Flexibility and scalability of data collection solutions	
	Introduce only technologies appropriate to the context of the company		Build data competences among employees, customers and partners	
	Technical support by technology vendor		Advanced infrastructure for data management and analytics	
	Implementation of cyber security and data protection solutions			
Top management and leadership skills	Strong leadership and a digital mindset	Environmental and financial resources and tools	Availability of financial resources for the digitalization projects	
	Clear vision from company leaders		Availability of intelligent decision support tools	
Human Resource Management (HRM) practices	Top management involvement, commitment and support		Proper design of workplaces to ease the human-automation symbiosis	
	People involvement and empowerment		Establish payback of MDT investments	
	Retention plans for key employees			
	Adopt clear strategies to motivate personnel (incentives)			

Category	Factor/Enabler		
Organizational development and change management	Improve commitment to change	Management and planning practices	Precise definition of maintenance objectives
	Adopt effective change management practices		Efficient project management practices
	Adopt gradual change approaches		Novel principles for maintenance planning with systems perspective
Legal and administrative aspects	Address the legal restrictions that might prevent from adopting technology		Early integration planning, goal alignment and proper management
	Adhere to environmental standards during the implementation		Necessary rethinking of organization's business processes
External collaboration and integration	University industry collaboration		Performance management of digital maintenance work
	Collaboration between companies	Risk management techniques	
	Collaborative relationships with suppliers	Digital Strategy - Strategic Alignment	Having a strategy: systematic approach to adopting maintenance digitalization
	Close links between inter-organizational components		Link and align any developments to the defined maintenance strategies
Employing strategic alliance	Create a common vision for DM		
Internal Integration and collaboration	Integration of operation functions through open sharing of data and interdepartmental collaboration		Transforming business objectives into long-term e-maintenance trends
	Focus on team-working as a primary organizational lever	Organizational culture	Create a robust digital culture
	Promote inter-functional teams with multiple skills		Continuous improvement attitude
	Use of self-managing work teams		Innovative culture
	Ensure sufficient collaboration between people with traditional expertise, and people with data-specific competences	Culture of data driven decision making	
Knowledge management and Workforce skills development	Continuous education and training to develop the maintenance workforce with both digital and social competence	Organizational structure	Promote interdisciplinary teams
	Knowledge management tools		Restructure organizations and define clear roles and responsibilities
	Periodic skill evaluation and updating of the employees	Involvement of positions of innovation managers and chief digital officer	
	Include new talents: experts of I4.0 and data scientists		
	Create multidisciplinary teams		
	Properly adapt learning programs to the needs of changing maintenance trends		
	Influence the development of education programs for future employees		

1.1.8 Évaluation des indices de maturité numérique

Les organisations peuvent utiliser le modèle de maturité pour les aider à se développer étape par étape selon un modèle d'industrie 4.0, un système de fonctionnement agile et un modèle de maintenance 4.0. La première étape c'est l'identification du degré de maturité actuel des différents domaines fonctionnels de l'organisation. L'étape suivante consiste à définir, selon des stratégies bien établies, les objectifs à atteindre en termes de développement à la fin du processus de transformation. L'étape finale consiste à formuler des actions et les développer dans une feuille de route en vue développer les capacités nécessaires pour atteindre le niveau de maturité souhaité. (Emanuel Albu, 2010)

Cet article (Emanuel Albu, 2010) présente une matrice d'indices de maturité permettant de diagnostiquer l'état actuel de l'organisation, de planifier son état futur désiré et d'anticiper sur la coordination du changement de solution. Une évolution graduelle à petits pas est toujours plus intéressante qu'une idée de révolution, lorsqu'on aimerait avoir une amélioration continue des processus. Dans cet article (Emanuel Albu, 2010), l'auteur a effectué une synthèse de plusieurs articles présentant différents modèles, critères et stage de maturités. Dans cette revue de littérature de la croissance des modèles de maturités des organisations, ils ont fait la remarque suivante :

- Il n'y a aucun accord sur les caractéristiques organisationnelles alignées justifiant leur bon niveau de maturité.
- Il n'y a aucun accord en ce qui concerne les niveaux de croissances de maturité de chaque organisation.
- Un ensemble de processus organisationnels et de structures sont affectés à chaque stage du développement et les contributions à son succès peuvent changer à chaque stage.
- Certains de modèles de maturités sont développés pour des industries ou des organisations spécifiques.
- Très peu de modèles de maturités prennent en considération la culture ou les valeurs organisationnelles.

En tenant en compte les éléments mentionnés ci-dessus, ils ont pu créer un nouveau modèle d'évaluation de la maturité numérique des entreprises qui intègre les fonctionnalités de plusieurs modèles de maturités de référence et qui pourrait être utilisé par différents types d'organisations. Le but de ce nouvel outil est d'avoir une matrice simple, visuelle et qui permettrait d'effectuer des conclusions évidentes. (Emanuel Albu, 2010)

Ils ont choisi en tenant compte de la majorité des articles passés en revue d'adopter 4 niveaux de modèles de maturités à savoir : débutant, la maturité faible, la maturité médium, la maturité élevée. Ils ont utilisé le cadre 7-S de MCKinsey parce qu'il fournit un cadre qui permet de considérer l'entreprise dans son ensemble. Dans leur nouvel outil, ils ont utilisé les catégories redondantes dans les précédentes études et ceux du cadre 7-S, afin de savoir quels paramètres évaluer à chaque niveau de maturité.

Les catégories les plus courantes sont les suivantes : la stratégie, la structure, le système et les processus, les caractéristiques de management (style), le personnel, les compétences, et les valeurs partagées.

Les outils développés dans cet article (Emanuel Albu, 2010) mettent l'accent dans ces catégories sur les éléments suivants :

- A. La stratégie et les objectifs** : dans cette catégorie l'accent est mis sur la vision et les objectifs stratégiques énoncés.
- B. La structure** : ici, l'accent est mis sur le degré de formalité dans la structure, les prises de décisions, l'utilisation des équipes et la coordination du personnel.
- C. Le système et les processus** : ici, l'outil met l'accent sur le contrôle, les récompenses, les processus des ressources humaines et le système d'information.
- D. La direction et la gestion (style)** : ici, l'outil met l'accent sur l'approche opérationnelle de l'organisation.

E. Personnel et compétences : ici, on s'intéresse à la quantité et à la qualité du personnel, aux compétences individuelles et de groupe dont aurait besoin l'organisation pour atteindre ses objectifs.

F. Les valeurs partagées (organisation de la culture) : sur cette caractéristique, l'accent est sur les idées ou concepts qui sont tenus en haute estime par les membres qui ont conçu la philosophie, les processus et les objectifs de l'organisation.

La description des caractéristiques 7-S et des quatre de niveaux de maturité est faite en détail dans l'article << *A new tool for assessing maturity alignment : the enterprise maturity matrix* >>. L'outil final développé dans cet article est le tableau 1.6 est appelé << *La matrice de maturité des entreprises* >>. Il permet de déterminer le niveau de maturité d'une organisation en évaluant individuellement ses différentes caractéristiques selon les niveaux de maturités préétablies.

Tableau 1.6 La matrice de maturité des entreprises
Tiré de Emanuel Albu, Carmen Panzar (2010, p. 10)

TABLE 7 THE ENTERPRISE MATURITY MATRIX				
ELEMENTS	MATURITY LEVEL			
	1: START	2: LOW	3: MEDIUM	4: HIGH
Strategy	Short-term goals; no vision	Direction and objectives are identified	Vision and strategy are well developed	Common vision; continuous reevaluation; <i>revitalization crisis</i>
Structure	Simple structure	Structured functionally	Complex structures; <i>red tape crisis</i>	Lean and mean structure
Decision	Centralized	Empowerment is limited; <i>delegation crisis</i>	Empowerment at profit center level	At team and individual levels
Teams	Individual heroics	Task teams	Process teams	Self-managed teams
Systems	Overlapping activities	Unconnected processes	Processes in place	Extended processes
Control	Informal control system	Diagnostic and quality checks	KPI; beliefs; boundaries	Interactive; beliefs; boundaries
Rewards	No formal system	Performance system	Strategic rewards	Balanced measures
HR	Personnel administration	Competency-based practices	Competence management	Continuous workforce improvement
Information flow, IT	Ad hoc use	Improved accessibility	Efficient process	Seamless integration
Style	Directing/telling; <i>leadership crisis</i>	Selling	Delegation with control	Delegating
Staff and skills	Enthusiasm; energy	Technical competences	Disciplined teamwork	Alignment with strategic goals
Shared values, norms	Founders' values	Implicit values	Explicit values	Internalized values
Culture	Adhocracy	Clan	Hierarchy	Market culture

Sur ce le tableau ci-dessus (tableau 1.6), on remarque que les éléments ou les caractéristiques dont on doit observer leurs niveaux de maturités sont plus nombreux que les principales citées plus haut. Certains des éléments de la première colonne peuvent être regroupés ensemble pour reconstituer les 7 caractéristiques principales nommées plus haut ; mais dans ce tableau ils ont décidé de les séparer pour être en mesure d'avoir une vision distincte de comment chacun de ses éléments interviendrait dans l'évaluation de la maturité d'une organisation. (Emanuel Albu, 2010)

L'exploration et la maîtrise des techniques de traitement des données de maintenance sont des étapes très importantes si on voulait installer ou mettre sur pied un modèle de fonctionnement de maintenance 4.0. Le traitement et l'analyse des données de maintenance est certes le cœur du fonctionnement d'un modèle de maintenance 4.0, mais pour qu'il soit mis en place et fonctionne correctement et il serait nécessaire de maîtriser les autres aspects de sa gestion. Le fonctionnement de l'organisation où le modèle de maintenance 4.0 sera implémenté et les autres aspects qui interviennent dans sa transition doivent être en adéquation lui. Les autres aspects de l'organisation à gérer pour s'assurer d'une bonne transition sont les suivants :

- La Maturité numérique,

Il serait important de se rassurer que les infrastructures que l'organisation possède ou compte acquérir seront suffisantes et adéquates pour accueillir un modèle de maintenance 4.0.

- Transformation numérique,

Il serait nécessaire d'avoir une maîtrise des éléments de transformation numérique lorsqu'on veut mettre en place un modèle de maintenance 4.0 afin de se rassurer que les processus, les moyens et les outils employés seront ceux qui nous permettraient d'obtenir le produit final souhaité en sortie.

- La gestion de changement,

La gestion de la transition numérique, du personnel, des infrastructures et autres sont des éléments qui contribueraient à assurer une veille technologique du modèle de maintenance 4.0

implémenté dans une organisation. Il serait important de savoir comment un tel changement serait perçu par les différents niveaux de personnel, mais aussi s'assurer qu'ils possèdent les outils nécessaires pour appréhender un tel changement. Une fois un modèle de maintenance 4.0 mis en place, il faudrait s'assurer qu'il reste performant, opérationnel et qu'il évolue en temps et en lieu.

- Les critères de succès et d'échecs

Concevoir et implémenter un modèle de maintenance 4.0 est une opération qui peut nécessiter une mobilisation de ressources importantes, c'est pour cette raison qu'il est important de maîtriser les éléments qui pourraient contribuer à son succès ou son échec avant de l'initier. Il n'existe pas de liste des exhaustives de critères de succès et d'échecs d'un modèle de maintenance 4.0 et ils peuvent varier en fonction selon le modèle de fonctionnement de l'organisation. Aussi un projet de maintenance 4.0 peut être perçu comme un succès ou échec selon les objectifs fixés au départ et selon la position des personnes concernées par le projet.

CHAPITRE 2

PROPOSITION D'UNE MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDES PRÉLIMINAIRES D'IMPLEMENTATION D'UN MODÈLE DE MAINTENANCE 4.0 ET DE PRÉSÉLECTION D'ALGORITHMES DANS UNE ORGANISATION

L'avènement des nouvelles technologies, les avancées dans le domaine de l'informatique et de l'ingénierie transforment de jour en jour le processus de gestion de la maintenance des systèmes. Cette section de notre étude nous donnera une vision globale du modèle de fonctionnement et d'exploitation des systèmes dans une organisation en vue de faire évoluer sa maintenance et son organisation vers un modèle prédictif 4.0 optimisé en termes de gestion des systèmes. Notre travail dans cette section consistera à effectuer une étude préliminaire des points prioritaires qui pourrait permettre d'améliorer la performance des systèmes d'une organisation. Nous présenterons les outils et les méthodes d'études préliminaires d'élaboration d'un projet de maintenance 4.0 que nous avons développé, à savoir l'outil de sélection d'un algorithme de maintenance et le concept d'interrelation entre l'ensemble des éléments d'une organisation reliée à la maintenance. Nous procéderons dans les deux cas pratiques considérés, par élaborer des outils et des méthodes d'analyse partant du parc matériel (équipements) jusqu'à la planification des travaux de maintenance, en passant par la gestion des données et des ressources.

2.1 Études préliminaires d'élaboration d'un projet de maintenance 4.0

2.1.1 Maturité numérique

L'étude et l'analyse de la maturité numérique sont une des étapes indispensables lorsqu'on voudrait implémenter un modèle de fonctionnement 4.0 de la maintenance dans une organisation. Elle permet de déterminer si l'organisation est suffisamment outillée pour accueillir un modèle de maintenance 4.0. Grâce à l'étude de maturité numérique, il est possible de savoir quelles ressources possède ou devrait posséder l'organisation pour accueillir et respecter les conditions de fonctionnement d'un modèle de maintenance 4.0. L'étude de la maturité numérique d'une organisation permet de savoir :

- À quel niveau de maturité se situent ses caractéristiques ou facteurs principaux,
- À quel niveau on aimerait les faire évoluer afin d'atteindre de façon progressive le niveau de maturité visée par l'organisation ou nécessaire à l'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0.

Après avoir effectué une revue de littérature sur les indices de maturité numériques, nous avons retenu le modèle de l'article <<*a new tool for assessing maturity alignment : the enterprise maturity matrix*>>. Le choix de cet outil («*the Enterprise maturity matrix*») d'aide à l'évaluation de la maturité a été justifié par le fait qu'il a été conçu grâce à une revue de littérature et en combinant les outils de détection de maturité numérique déjà existants. Même si cet outil semble être un choix judicieux pour déterminer la maturité numérique d'une organisation, il serait quand même important de garder un œil sur la recherche en lien avec lui afin de se rassurer qu'il n'existe pas d'outils plus performant et plus efficace.

Après avoir compris le concept d'étude de maturité numérique d'une organisation, les questions qu'on pourrait se poser sont les suivantes :

- Quel est sont les éléments à analyser ?
- Est-ce qu'il y a parmi les éléments à analyser certains qui sont plus importants ou plus indicateurs du niveau de maturité ?
- Est-ce que l'ordre d'analyse de ces éléments est important si oui par quels éléments commencés ?

Les éléments à analyser dans l'outil «*the Enterprise maturity matrix*» pour déterminer la maturité numérique d'une organisation sont énoncés dans le tableau 2.1 ci-dessus. Le choix de ses éléments provient d'une synthèse entre les éléments principaux 7-S du cadre McKinsey et ceux de plusieurs autres articles. Dans l'outil que nous avons développé pour répondre aux questions posées ci-dessus, nous avons utilisé le l'outil «*the Enterprise maturity matrix*» et les 7 caractéristiques principales du modèle McKinsey pour regrouper tous les éléments tu tableau

« *the Enterprise maturity matrix* » en 8 groupes (voir tableau 2.1). Ces 8 groupes ont été ensuite classés en 4 domaines qui seraient en lien avec un projet de maintenance 4.0 dans une organisation à savoir, la technologie, l'institution, les données et l'humain. Tableau 2.1

Tableau 2.1 Éléments de maturité numérique à analyser

Éléments principaux de l'outil « <i>the Enterprise maturity matrix</i> »	Éléments principaux du cadre 7-S de McKinsey	Les 8 groupes obtenus après avoir combiné les deux outils précédents.	Classification des 8 groupes dans les domaines de l'organisation en lien avec la maintenance 4.0
<ul style="list-style-type: none"> • Stratégie • Structure • Decision • Équipe • Système • Contrôle • Récompense • Ressources humaines • Flux d'information/Informatique • Style (leadership et gestion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Stratégie • Structure • Système et processus • Caractéristiques de management (style) • Personnel • Compétences • Valeurs partagées 	<ul style="list-style-type: none"> • Structure ; Décisions • Stratégie (Vision and goal) • Flux information /Informatique • Système ; Contrôle 	<p><u>Technologie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Structure ; Décisions • Stratégie (Vision and goal) <p><u>Institution</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Culture ; Valeurs partagées et normes

Éléments principaux de l'outil « <i>the Enterprise maturity matrix</i> »	Éléments principaux du cadre 7-S de McKinsey	Les 8 groupes obtenus après avoir combiné les deux outils précédents.	Classification des 8 groupes dans les domaines de l'organisation en lien avec la maintenance 4.0
<ul style="list-style-type: none"> • Personnel et compétences • Valeurs partagées et normes Culture 		<ul style="list-style-type: none"> • Ressources humaines, Équipe ; personnel et compétences • Récompense de la direction • Style (Leadership, gestion) • Culture ; Valeurs partagées et normes 	<ul style="list-style-type: none"> • Style (Leadership, gestion) <p style="text-align: center;"><u>Données</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Flux information/Informatique • Système ; Contrôle <p style="text-align: center;"><u>Humain</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Récompense de la direction • Ressources humaines, Équipe ; personnel et compétences

Afin de répondre aux questions posées ci-dessus concernant l'ordre de priorité des éléments à analyser, nous avons utilisé la méthode d'interrelation entre les 8 groupes des 3 colonnes du tableau 2.1. L'interrelation permet de déterminer les relations qui existent et qui lient les 8 groupes des éléments d'indices de maturité de la chaîne de blocs. On distingue deux types de relations, celles qui sont sens unique représenté par une flèche à sens unique et celles qui sont à double sens représenté à par une simple ligne droite. Figure 2.1

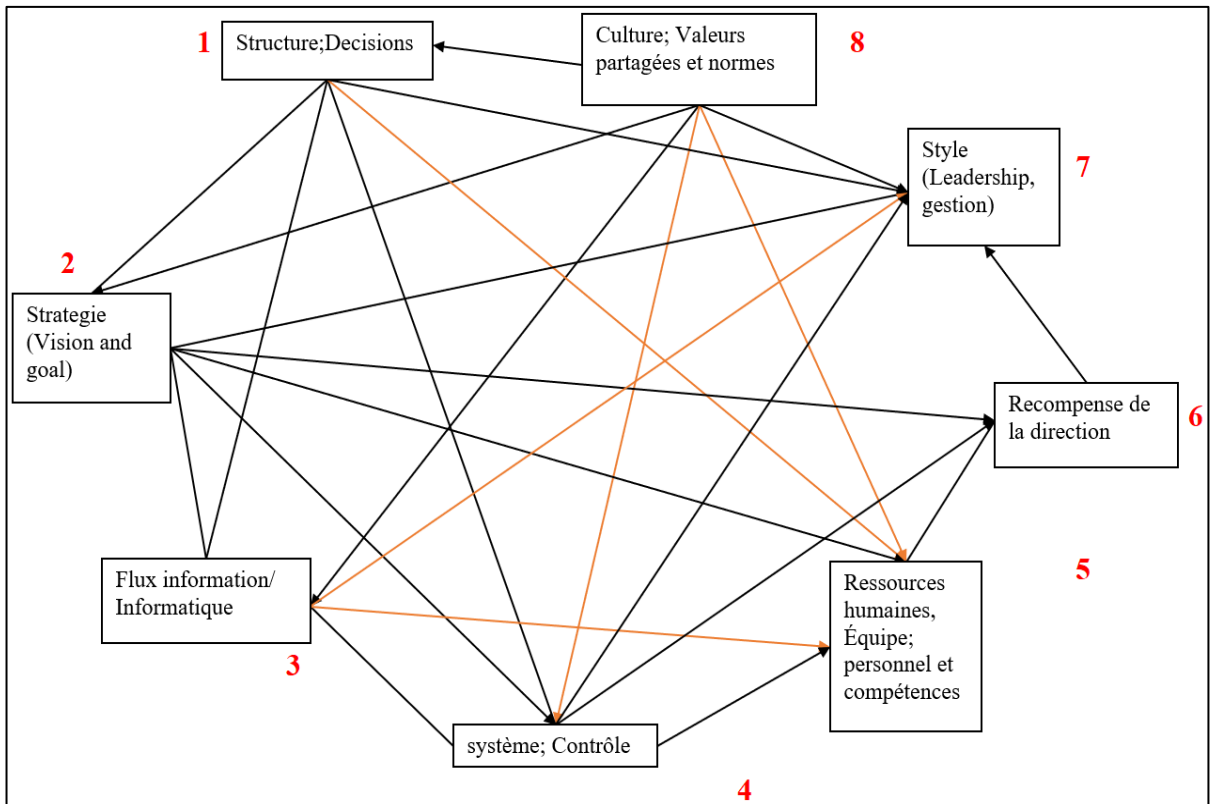


Figure 2.1 Interrelation entre les 8 groupes des éléments d'indice de maturité

Les lignes en orange sur la figure 2.1 sont les interrelations qui sont presque inexistantes, que nous pouvons supprimer pour alléger notre figure.

Après avoir supprimé toutes les lignes orange, nous avons déplacé tous les blocs afin que les flèches à sens uniques soient indiquées de la gauche, c'est-à-dire que le bout de ces flèches devrait pointer vers la droite. En réorganisant le bloc de la chaîne d'interrelation comme indiqué, on obtient la figure 2.2 suivante :

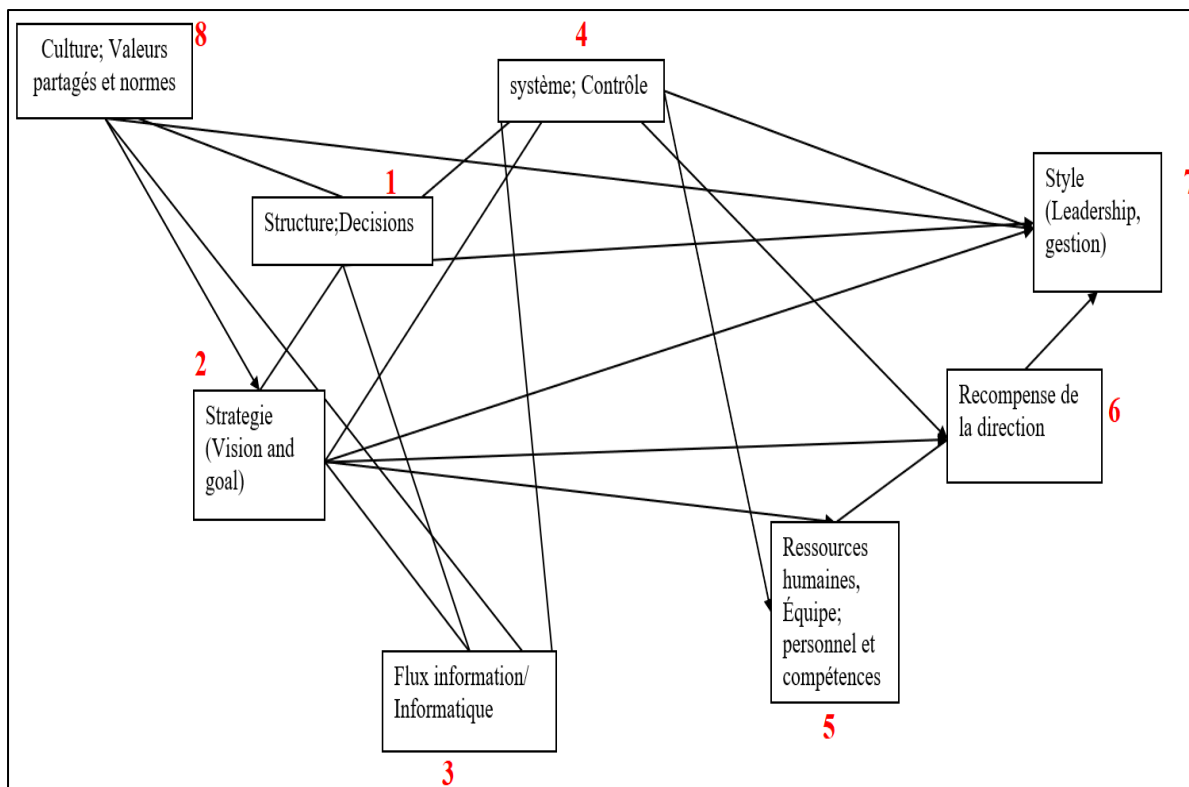


Figure 2.2 Interrelation réorganisée entre les 8 groupes des éléments d'indice de maturité

On remarque sur la figure 2.2 ci-dessus que les éléments de cultures, de valeurs partagés et normes sont les premiers qu'il faudrait examiner lorsqu'on évalue la maturité numérique d'une organisation. Le fait d'agir sur les éléments de cultures, de valeurs partagés et normes aurait une incidence sur tous les autres facteurs de l'organisation, ce qui justifierait que ces éléments soient les plus importants et les premiers qu'il faudrait analyser dans la chaîne de blocs d'interrelation.

Le schéma d'interrelation met aussi en exergue la notion de causalité entre les 8 groupes d'éléments permettant de déterminer les indices de maturité d'une organisation. La causalité permet de définir les relations de cause à effet ou de cause et de conséquences qui peuvent exister entre deux processus, deux objets ou deux éléments. Afin de mieux ressortir cette notion d'interrelation et de causalité entre les 8 groupes des éléments permettant d'évaluer les indices

de maturités, nous avons décidé de remplacer toutes les simples lignes droites par des flèches à sens unique, en dirigeant la flèche du groupe dont les éléments ont le plus d'influence vers le groupe qui possède des éléments ayant le moins d'influences entre les deux groupes. En appliquant ses consignes, on obtient la figure 2.3 ci-dessous.

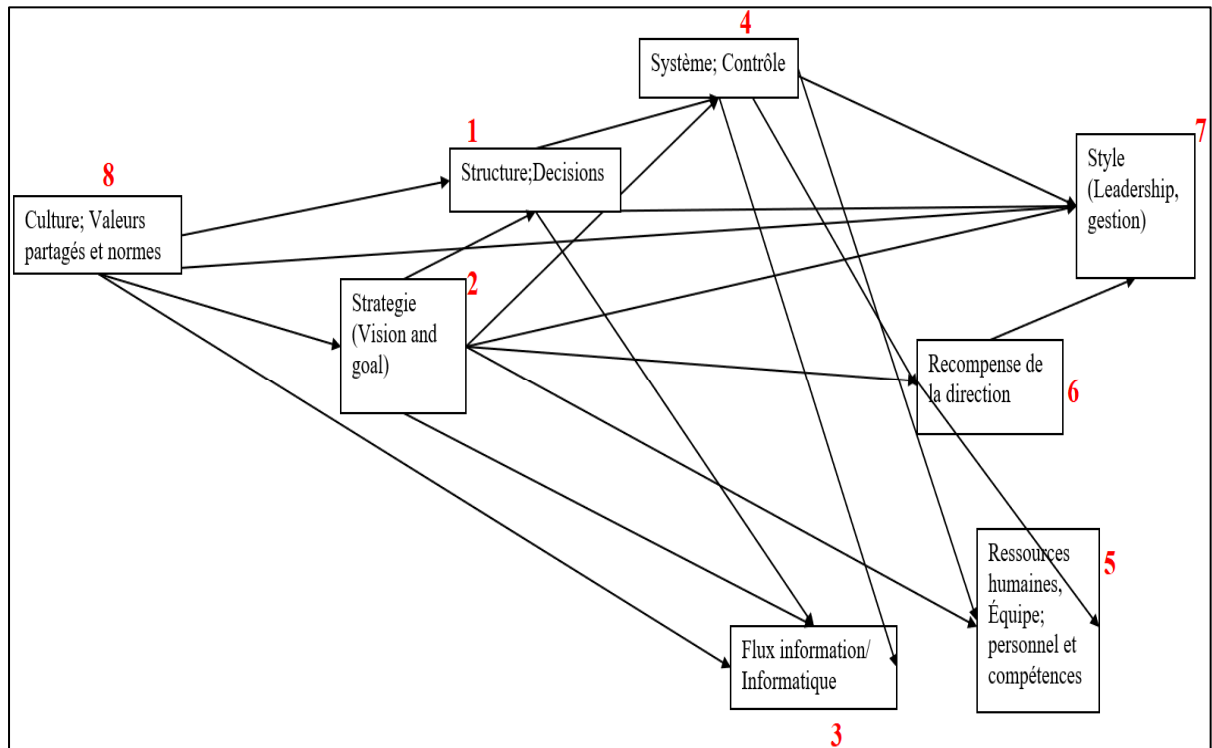


Figure 2.3 Interrelation réorganisée entre les 8 groupes des éléments d'indice de maturité en remplaçant les simples lignes droites par des flèches à sens unique et en appliquant la notion de causalité

Sur la figure 2.3 ci-dessus, on constate que l'ordre d'importance des groupes est plus défini que sur la figure 2.2 précédente. Le groupe 8 (culture, valeurs partagées et normes) reste toujours le plus important et le groupe 7 (Style, leadership et gestion) reste toujours le moins important de la chaîne de blocs. S'il fallait classer les groupes par ordre de priorité pour répondre aux 3 questions posées ci-dessus sur l'ordre d'importance des éléments permettant d'analyser la maturité numérique d'une organisation ; basée sur la figure 2.3 ci-dessus nous énumérerions les groupes dans l'ordre suivant : 8, 2, 1, 4, 3, 6, 5 et 7.

Après avoir déterminé l'ordre de priorité des éléments intervenants dans la détection de la maturité, la prochaine étape consisterait à choisir le modèle selon lequel on souhaiterait l'évaluer. Certains des modèles intéressants d'évaluation de maturité numérique que nous avons retenue dans cette revue de littérature sont ceux de <<Acatech maturity index>> et Tableau 1-4 « *the Enterprise maturity matrix* ». Parmi ces deux modèles, celui qui a retenu le plus notre attention est « *the Enterprise maturity matrix* », parce qu'il provient d'une synthèse de plusieurs modèles, il intègre un plus grand nombre d'éléments de modèles de maturité à analyser, il serait plus aussi explicite et simple d'utilisation.

2.1.2 Transformation numérique

Une fois, les niveaux de maturité des éléments de l'organisation déterminés, l'étape suivante seraient de situer le modèle de maintenance 4.0 et l'organisation sur échelle de progression de développement d'industrie 4.0. Un exemple d'échelle de progression d'industrie 4.0 est celui de « FIR e. V. at RWTH Aachen University » de figure 2.4.

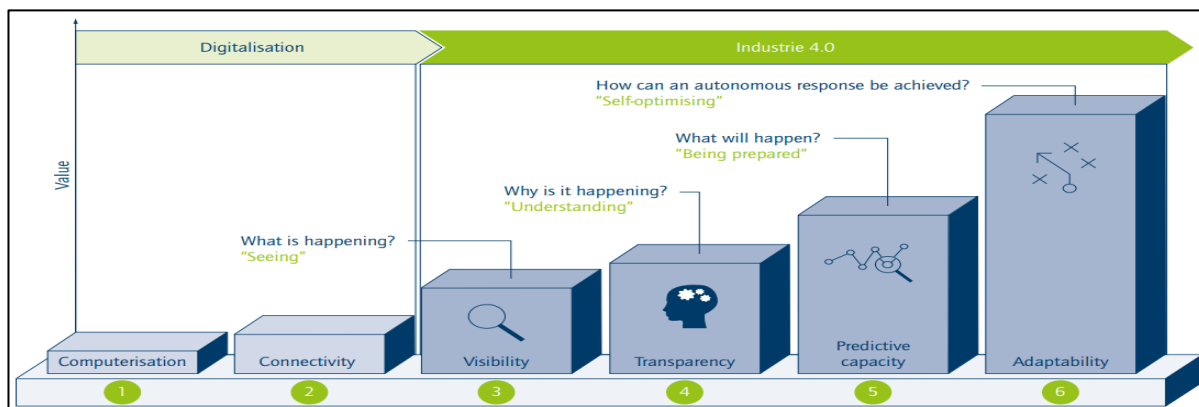


Figure 2.4 Étapes du parcours de développement de l'Industrie 4.0 (FIR e. V. at RWTH Aachen University)
Tirée de Günther Schuh (2017, P. 18)

Après avoir situé l'organisation ou son modèle de maintenance sur l'étape de parcours de l'industrie 4.0, il faudrait ensuite faire une analyse de l'existant (ressources, technologies,

main-d'œuvre, compétences, système d'information, etc.); afin de déterminer ce que l'organisation possède ou doit, acquérir qui serait favorable à l'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0. La transition vers un modèle de maintenance 4.0 numérique doit être faite par étape et de façon progressive. Il est important de se rassurer que le nouveau modèle de maintenance qu'on a implémenté soit fonctionnel, maîtrisé et mature avant de passer à l'étape suivante de la progression vers le numérique.

Comme indiqué dans le livre « *acatech i-40 maturity* » un projet de transformation numérique ou maintenance 4.0, une fois implémenté, doit être divisé en deux phases au niveau structurel :

i. Une phase de traitement de l'information. Cette étape peut elle aussi être subdivisée en sous-étapes suivantes :

- La disponibilité et le partage des informations,
- L'analyse des données,
- Le traitement de l'information par autoapprentissage,
- La sauvegarde des données,
- La gestion des infrastructures informatiques.

ii. Une phase d'intégration. Cette étape peut elle aussi être subdivisée en sous-étapes suivantes :

- Une intégration horizontale et verticale,
- Une intégration des systèmes d'information,
- Une gestion des interfaces,
- Une gouvernance des données,
- Une gestion du système de sécurité.

Il faudrait se référer au chapitre 1 de notre mémoire pour avoir plus de détails sur la définition de chacune de ces étapes et sous étapes. Lors du développement d'un projet de maintenance 4.0, on doit toujours garder à l'esprit que c'est l'humain qui sera au centre du projet et que les solutions développées seront destinées à lui.

2.1.3 Critères de succès et d'échecs

La réussite ou l'échec d'un projet de maintenance 4.0 peut être perçu de différentes façons, dépendamment de quel côté (utilisateur ou concepteur) on se situe. Les groupes utilisateurs et concepteurs peuvent parfois avoir des attentes différentes en ce qui concerne le succès et les fonctionnalités d'un projet de maintenance 4.0 et un de ses éléments de réussite pourrait être de trouver le juste milieu de satisfaction entre ces deux groupes. Il est impossible de prévoir en avance si un projet est à 100 % un succès ou un échec étant donné qu'il peut être perçu différemment par chaque individu peu importe le groupe auquel il appartient.

Les critères de succès ou d'échecs d'un projet de maintenance 4.0 ne peuvent pas être tous listés en avance et peuvent être influencés par des facteurs qu'on pourrait rencontrer lors de son l'implémentation ; mais il serait nécessaire d'en prendre connaissance de quelques-uns, afin d'être avisé des erreurs à éviter et de déterminer si l'évolution du projet est sur la bonne voie.

Les critères de succès et d'échecs d'un projet de maintenance 4.0 sont variés et devraient être abordés selon un point de vue macro et micro. Il faudrait commencer au plus bas de la chaîne et inclure toute la classe avant, pendant et après le démarrage du projet. La satisfaction aux critères de succès et d'échecs tout au long de la réalisation du projet de maintenance fait partie des éléments déterminant son succès et ces critères sont influencés par un ensemble de facteurs. Une fois devenus permanents et validés, certains de facteurs pourraient être considérés comme des critères.

Parmi les facteurs pouvant influencer un projet de maintenance 4.0, on distingue les facteurs qui agissent à toutes les phases du projet d'un point de vue macro, mais unique au niveau de la phase de construction d'un point de vue micro. Généralement l'achèvement (le temps) et la satisfaction (utilité et opérationnel) sont les critères de succès d'un projet de maintenance du point de vue macro ; ils sont souvent influencés par facteurs tels que : l'économie, le management, la supervision, le climat, la commodité, la situation géographique, le coût, le prestige, etc.

Le succès d'un projet de maintenance 4.0 du point de vue micro intervient au niveau de l'achèvement (le temps, le cout, la qualité, la performance et la sécurité) et peut être influencé par des facteurs tels que : des facteurs techniques, humains, financiers, commerciaux, des facteurs liés à l'organisation et aux risques environnementaux, etc.

Pour obtenir une description spécifique des facteurs influençant un projet de maintenance 4.0 dans un cadre de transformation numérique et en fonction des domaines de l'organisation, se référer aux tableaux 1.4 et 1.5 du chapitre 1.

2.1.4 Gestion de changement

Il serait nécessaire de considérer, d'inclure et de faire intervenir tous les départements, les profils et les classes de travail, dès le début du processus afin de s'assurer qu'ils comprennent et sont sous en accord avec les changements qui seront opérés.

Il ne faudrait pas considérer le nouveau modèle de maintenance comme acquis et complet, mais plutôt effectuer une vieille technologie de tous les éléments qui le constitue. Fonctionner selon un modèle de maintenance 4.0 pourrait posséder beaucoup d'avantages et pour le garder fonctionnel et à niveau, on doit se préoccuper de son environnement (technologies, IOT, ressources, etc.) qui changerait avec le temps, ce qui implique qu'il serait amené à évoluer.

Nous avons pu constater grâce à l'outil développé dans la section précédente que l'un des 8 groupes serait le plus important dans la chaine de bloc des éléments d'indices de maturité. Ce groupe contient un des éléments qui est la culture. Changer la culture d'une organisation revient à devoir agir sur presque tous les autres éléments de la chaine. Le changement amélioratif de la culture d'une organisation passerait donc par :

- Une confiance au processus,
- Bonne collaboration,
- Un management démocratique,
- Une ouverture à la communication,
- Un apprentissage orienté sur une base de données,
- Une reconnaissance des erreurs déjà présentes dans le système,

- Un désir de changer,
- Une modélisation du changement,
- Une ouverture à l'innovation,
- Un développement professionnel continu.

Les capacités d'une organisation peuvent être influencées par le changement de façon négative ou positive ; mais le succès d'un projet de maintenance 4.0 quant à lui dépendra de sa vision et de la gestion à la conduite au changement. Les changements venant de la réalisation d'un projet de maintenance 4.0 doivent être harmonisés, rigides, adaptatifs, évolutifs, et doivent être là pour durer. Les origines du changement peuvent être interne (technologie, services, personnel, etc.) et externe (climat, concurrence, population, etc.), donc nécessiter l'emploi de plusieurs approches de changement qui sont listées dans le tableau 1.4 du chapitre 1.

Les origines internes du changement peuvent être liées à la technologie, aux services, au personnel, à la gestion, aux méthodes de travail, etc. Les origines externes quant à elles peuvent être liées au climat, à la concurrence, à la population.

2.2 Méthodes d'études préliminaires du processus de fonctionnement d'une organisation en vue de l'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0

L'amélioration des procédés bénéficie de l'avancée des technologies et les techniques de gestion des ressources. Une des avancées technologiques qui revient souvent quand on évoque le modèle de maintenance 4.0, c'est l'intelligence artificielle. L'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0 passe par un audit de l'organisation pour déterminer son mode de fonctionnement et une stratégie qui sera plus efficace pour elle. Nous présenterons donc des points essentiels qu'il faudrait examiner dans le fonctionnement d'une organisation pour implémenter un modèle de fonctionnement de maintenance profitable. Ces points essentiels seront avant tout axés sur les processus de maintenance et l'intelligence artificielle.

2.2.1 Parc matériel et possibilités d'interconnexion via l'internet des objets

Dans le cas de la centrale de traitement des eaux usées et à l'hôpital Honoré-Mercier, l'étude des parcs matériels (équipements) et leurs possibilités d'interconnexion, passe par l'audit des processus de maintenance. Il s'agit de faire une analyse des éléments suivants :

i. Les indicateurs de performance

L'objectif étant de pouvoir recenser les informations clés qui sont utiles à l'ensemble des processus et qui sont mesurées pour vérifier que tous les procédés ainsi que les équipements ou machines ont les rendements optimisés. Le recensement et l'analyse des indicateurs de performances mesurés dans l'ensemble du fonctionnement des organisations dont il est question contribuent en grande partie à comprendre comment celles-ci fonctionnent, afin de juger de la pertinence des informations collectées, ainsi qu'à se questionner sur la façon dont ces informations sont interprétées.

ii. L'acquisition des données

Se questionner sur la façon dont les données sont collectées permet de faire un lien avec la façon dont la santé des systèmes ainsi que celle des procédés est évaluée. Il s'agit donc de faire une étude sur les données afin de déterminer quels sont leur type, la façon dont leur acquisition est faite, leur provenance, leur signification et comment elles seront interprétées plus tard. Tout ceci consiste à déterminer si l'approche d'acquisition de données existante est meilleure pour la qualité et la productivité.

iii. Les capteurs existants

La technologie utilisée pour la conception des capteurs existants dans les systèmes est très importante, car c'est elle qui va définir le type de données et la façon dont elles vont être recueillies. Le processus de mise en place d'un modèle de maintenance 4.0, passe par l'analyse des capteurs existants et de leurs connectivités. Le recensement des capteurs et leurs modèles de fonctionnement permettent de définir le degré de progression d'une industrie ou d'une

maintenance en modèle 4.0. C'est ainsi qu'on sera capable de déterminer les ressources manquantes pour une transition vers le modèle 4.0 utilisant l'internet des objets.

iv. Le cout de l'existant (maintenance, collecte et stockage des données)

L'un des objectifs majeurs d'un modèle de maintenance 4.0 étant d'optimiser les couts de fonctionnement et les opérations de maintenance, tout en améliorant leurs performances et leurs méthodes de travail. Faire une étude préliminaire de ces couts revient à évaluer quelles sont les dépenses d'une organisation dans ce domaine et leur proposer des stratégies ; en rapport avec des technologies innovantes adaptées à leur organisation et leurs méthodes de travail. Ce qui leur permettra de faire des économies et d'être plus efficaces dans leur façon de travailler. (Rioux, 2020)

2.2.2 Processus de transmission des données via des capteurs intelligents

Le processus de transmission de données peut-être une tâche complexe et déterminante pour son fonctionnement. Les éléments clés à examiner pour étudier le processus de transmission des données sont les suivants :

i. Technologie de transmission de données

La transmission des informations d'une machine à une autre ou d'un département à un autre passe par une technologie bien précise et pour la plupart de temps adaptés au débit de données de l'entreprise et au contexte d'utilisation. Les différentes technologies telles que le wifi (Wireless Fidelity), le Bluetooth, la RFID (Radio Fréquence Identification), le réseau câblé internet, NFC (Near Field Communication), etc. (Adhoc) sont des moyens de communication les plus souvent utilisés, chacune ayant un principe de fonctionnement distinct et adapté au fonctionnement de l'organisation. Il est donc nécessaire de répertorier les technologies utilisées pour la communication et la transmission de données afin de déterminer si elles seront adaptées au modèle de maintenance 4.0 ou d'une industrie utilisant les objets intelligents.

ii. L'existence des IOT sur les équipements existants

L'industrie 4.0, la maintenance 4.0 et les objets interconnectés (IOT) sont des concepts qui sont pour la plupart très souvent associés ensemble. L'existence des objets interconnectés et des nouvelles technologies dans une industrie pourrait nous donner une idée sur son développement et son avancement en termes d'innovation. La majorité des industries qui aujourd'hui ont déjà entendu parler du 4.0 sont intéressées à l'essayer ; mais son implantation passe par l'analyse de l'existant en termes d'équipement et de technologie afin de s'assurer que la communication entre les différents départements sera rapide, fluide et optimale et qu'il aura une compatibilité entre les capteurs et les équipements. Il est aussi important de vérifier que les technologies employées ne seront pas gênées dans le processus de communication et transmission des données d'un département à un autre. C'est la prise en considération de ces éléments qui vont permettre l'acquisition adéquate d'équipements ou l'adaptation essentielle pour la progression d'une industrie vers le 4.0.

iii. Environnement industriel, matériau de construction des bâtiments

Les bâtiments sont la structure qui abrite un environnement industriel, mais parfois ils peuvent oublier lors d'une tournée d'analyse en vue de migrer vers un modèle 4.0. L'environnement industriel et les matériaux de construction des bâtiments peuvent parfois créer des interférences ou altérer la qualité du signal qui sera transmis, ce qui pourrait avoir des effets sur le signal transmis d'un récepteur à un autre. Un signal qui a été modifié peut avoir des répercussions sur le traitement des données, donc par ricochet sur la maintenance 4.0 et parfois le processus industriel. La vérification à cette étape se fait au niveau des matériaux de construction, de l'isolation des canaux conducteurs et des équipements pour être certains que la transmission de données se fait ou se fera sans interruption ou sans interférence.

iv. Les applications et l'équipement déjà utilisés dans l'entreprise

Le recensement des équipements et applications est indispensable et très important dans le processus de transition d'une industrie vers la 4.0, car ce sont ces éléments qui seront plus tard le centre d'intérêt principal du modèle 4.0. Il est donc question à cette étape de faire un

recensement et une étude de tout le parc matériel et logiciel existant, en essayant de comprendre leur modèle de fonctionnement et leurs moyens de communication. Cette étude sera faite dans le but de déterminer si les équipements et les logiciels qui vont devoir être remplacés, modifiés ou améliorés vers un modèle 4.0 plus optimal. Une des difficultés ici réside souvent dans le fait que certaines industries sont habituées à leur modèle de fonctionnement depuis plusieurs années, ce qui contraint parfois les ingénieurs à leur proposer des systèmes de fonctionnement plus élaborés qui devront absolument intégrer et tenir compte des anciennes fonctions même si cette option reste le moins efficace.

v. Les logiciels déjà en place et type de données produites

La plupart des industries aujourd'hui font des sauvegardes de leurs données ou procèdent des équipements qui le font, même si parfois elles n'en sont pas conscientes. Être familier avec les logiciels que ces équipements utilisent permet d'avoir une idée sur le type de données qui sont prises en charge, c'est pour cette raison qu'il est nécessaire dans un processus de transition vers la maintenance ou l'industrie 4.0 ; d'avoir une idée sur les logiciels déjà en place et savoir comment ils fonctionnent afin de planifier leur intégration vers la transition.

vi. Le processus de gestion de la maintenance

Le processus de gestion de la maintenance est l'un des éléments les plus importants dans la transition vers la maintenance ou l'industrie 4.0. L'étude du système de maintenance déjà existant dans une industrie donne une idée sur les améliorations à faire si nécessaire pour effectuer une bonne transition. Tous les éléments à examiner lors de l'analyse d'un système de maintenance déjà existant sont :

- Les routines de ceux (technicien, préposé à la tâche, ingénieurs, informaticien, mécaniciens, etc.) qui effectuent la maintenance et l'entretien, quel que soit le type,
- Les outils matériels et logiciels utilisés pour les opérations des maintenances,
- Les systèmes de stockages des données utiles à la maintenance,
- Les systèmes d'attribution des tâches de maintenance à chaque employé,
- Les méthodes et les fréquences d'utilisations des ressources matérielles et humaines,

- La disponibilité et la facilité d'accès aux pièces de rechange lorsque c'est nécessaire,
- Le budget alloué pour toutes les actions de maintenance,
- Le système de sous-traitance de la maintenance.

Il est tout aussi important de laisser savoir au personnel qui va s'occuper de l'audit du processus de maintenance, si vous comptiez effectuer des changements importants dans un futur très proche afin qu'ils puissent l'intégrer dans leur processus d'analyse.

2.2.3 Procédure d'analyse des méthodes de suivi, de vérification et d'interprétation des données

La gestion des données est l'une des étapes les plus importantes dans le processus de migration d'une industrie ou d'une maintenance vers le 4.0 (maintenance ou industrie utilisant des objets intelligents). Pour bien anticiper les besoins futurs d'une industrie ou d'une entreprise en termes de gestion de données, de maintenance et de fonctionnement industriels, il est important de comprendre et de décrire comment les opérations suivantes sont faites :

2.2.3.1 Examen du suivi des données

Lors du fonctionnement des équipements d'une industrie, d'une entreprise ou pendant les opérations de maintenance ; des quantités importantes de données sont le plus souvent stockées de façon automatique ou manuelle. Ces données qui sont censées servir pour analyse avec comme objectif l'amélioration des procédés, le suivi des équipements, la surveillance des machines, l'économie au niveau des budgets de maintenance et autres ; sont pour la plupart non exploitées par ces entreprises. Pour une transition vers le 4.0, l'étude du suivi des données consiste à obtenir au préalable les informations suivantes :

i. À quel endroit sont stockées les données

Le stockage des données est une opération qui doit être faite de façon minutieuse, car elle va déterminer en grande partie la réussite de la transition d'une industrie vers une transition 4.0. Il est nécessaire pendant le processus d'analyse des besoins d'une industrie qui souhaite transiter vers le 4.0 de savoir quelle serait sa capacité de stockage et où seront stockées les

données. Il est aussi important de savoir quelles sont les caractéristiques du support de stockage des données afin de pouvoir évaluer s'il sera adéquat et adapté aux nouvelles installations qui seront peut-être nécessaires.

ii. La fréquence et le processus de stockage des données

Une fois qu'on sait exactement où est-ce que les données seront stockées, il est aussi important de comprendre comment et à quelle fréquence les données sont stockées. S'interroger sur la validation, l'élimination du bruit, le nettoyage des données, la correction des erreurs, la compensation de données manquantes et toutes les autres techniques de prétraitement des données avant leur stockage permet d'avoir une idée sur le prétraitement des données du système déjà en place permettant ainsi de déterminer la compatibilité du processus déjà en place avec celui des algorithmes intelligents de traitement des données.

iii. Le format sous lequel les données sont stockées

S'interroger à propos du format sous lequel des données déjà existantes sont stockées pendant la phase d'étude de la migration d'une industrie vers le 4.0 aide à déterminer leur compatibilité avec les algorithmes futurs de traitements de données intelligents seront peut-être installés.

iv. Les opérations de maintenance qui sont effectuées sur les données

L'analyse du processus de suivi des données existantes dans une industrie avant la migration vers le 4.0 est une action qui nécessite aussi de vérifier les opérations de maintenances qui sont effectuées sur les données. Se poser des questions sur les opérations des maintenances effectuées sur les données permettrait d'avoir un historique de ces opérations qui pourrait être intégré dans les nouveaux algorithmes intelligents pour anticiper ces opérations en avance ou les résoudre de façon automatique. Il serait donc nécessaire de poser la question aux ingénieurs responsables de cette tâche pour savoir quelles sont les actions de maintenances qui sont souvent effectuées sur les données, quelles les méthodes utilisées et à quelle fréquence.

2.2.3.2 Examen des procédures de vérification et d'interprétation des données

La vérification et l'interprétation des données sont l'une des étapes les plus importantes pour la réussite de la transition vers le 4.0 et pour le bon fonctionnement de la maintenance à partir des algorithmes intelligents. Vérifier et interpréter les données de maintenance ou de fonctionnement des équipements qui permettent la détection des anomalies au niveau des machines électriques ou électroniques. Afin de pouvoir faire la vérification et l'interprétation des données, il faudrait qu'elles soient existantes et exploitables, c'est pour cette raison qu'il est important lors du processus d'expertise des ingénieurs de savoir si les données sont sauvegardées, de quelles façons elles le sont, où elles sont sauvegardées, comment elles sont exploitées après ou lors de l'interprétation, etc. Ceci permettra ainsi de planifier une transition efficace vers un système de maintenance 4.0.

2.2.4 Étude de la construction des modèles de données

L'étude de la possibilité de construction d'un modèle de données qui pourrait être utilisé comme référence dans un système d'intelligence artificielle ou de maintenance 4.0 est assez complexe. Elle passe par les étapes et vérifications suivantes :

i. L'existence des données sauvegardées

La sauvegarde des données est indispensable pour la construction d'un modèle représentatif de données. L'existence au préalable des données permettent de définir plus tard la méthodologie et les algorithmes qui seront utilisés pour le traitement et l'analyse des données et même parfois l'orientation et le processus d'implémentation du projet, si elles sont exploitables. Les données sauvegardées pour être exploitables doivent avoir été enregistrées de façon méthodique en essayant d'éviter au maximum les erreurs d'enregistrement des données.

ii. Les caractéristiques des données sauvegardées

Les caractéristiques des données sauvegardées influencent la structure et la modélisation des algorithmes intelligents. Sans les caractéristiques des données et il serait impossible de les

classer, de les valoriser et même de les interpréter. Pour une entreprise qui possède des données et qui aimerait effectuer une transformation numérique, la première chose à vérifier au niveau des données serait de savoir si elles sont catégorisées en fonction de certains critères et que ces critères sont représentatifs des résultats qu'on souhaiterait obtenir.

iii. Les formes sous lesquelles les données sont sauvegardées

Les données peuvent être stockées sous plusieurs formes, quantitatives ou qualitatives, mais l'idéal lorsqu'on aimerait effectuer une transformation numérique serait de quantifier les données en leur attribuant des valeurs numériques afin que leur traitement et leurs interprétations à partir des algorithmes intelligents soient plus simplifiés.

iv. Les informations qu'on voudrait en tirer

Les informations qu'on pourrait obtenir du traitement et de l'analyse de données par les algorithmes intelligents dépendent des données qu'on possède et du modèle de données qu'on souhaite construire. Les valeurs critiques qu'on puisse en tirer une fois le modèle des données fonctionnel établi, peuvent provenir d'une synthèse, d'un tri, d'un calcul d'indicateurs statistiques (moyenne, écart-type, variance, covariance, écart moyen, etc.), d'un calcul de probabilité, d'une comparaison, etc. Ces valeurs critiques une fois interprétées nous permettent de savoir quels renseignements utiles les données pourraient nous retourner.

v. Les secteurs de l'industrie où on aimerait implémenter la maintenance 4.0

L'une des premières questions qu'on devrait se poser lorsqu'on veut mettre en place un système de maintenance 4.0 ou d'industrie 4.0 ; c'est de savoir les secteurs d'activités auxquels vont s'appliquer leurs utilisations. Ceci nous permettra d'anticiper sur les besoins futurs et de prédire les avantages qu'ils pourront apporter à long terme.

vi. Le choix des algorithmes qui pourraient être utilisés pour le prétraitement, le traitement et l'analyse des données

Le choix des algorithmes intelligents qui pourraient être utilisés pour la construction d'un modèle de données doit être fait en fonction du résultat final qu'on souhaite obtenir. Ce choix

dépendra aussi des méthodes de calculs qu'on utilisera pour traiter les informations, de la quantité et du type des données qu'on utilisera pour construire notre modèle.

vii. L'interconnexion des objets et des équipements entre eux.

Les choix des objets et des équipements à interconnecter sont une des étapes importantes du processus, il est important de vérifier au préalable que les systèmes qu'on aimerait étudier sont interconnectés et sinon il faudrait définir un plan d'action pour le faire. Du matériel de pointe et adapté aux besoins facilitera l'accès, l'acheminement des données et même la vitesse à laquelle l'information sera traitée.

viii. Le choix des méthodes d'alarmes et d'avertissement qu'on pourrait utiliser en cas de détection d'anomalies.

Il est important de toujours vérifier leur existence afin de trouver le moyen de les adapter aux nouvelles modifications. Les choix de ces moyens d'avertissements et les moments pendant lesquels ils apparaîtront seront guidés par les différents seuils de sécurités qui seront définis dans la surveillance de notre système et le type d'indicateur et d'indication qui provoqueront l'alarme.

ix. Les moyens de rendre fluide la communication entre les objets intelligents.

La vérification préalable d'une communication d'existence est importante ; d'où la nécessité de faire un bon recensement des équipements qui seront concernés par la maintenance ou l'industrie 4.0. La fluidité de la communication ici dépendra des logiciels et de la technologie qui sera utilisée pour l'amélioration de notre système.

Tous ces éléments pourraient conduire à une analyse qui convergerait vers des conditions qui pourraient rendre irréalisable la conception du modèle maintenance 4.0 ; dépendamment des résultats obtenus à l'issue des vérifications ci-dessus et de l'analyse financière.

2.2.5 Étude des moyens d’alerte et demande des travaux de maintenance

Savoir si la façon de générer les alertes et les demandes de travaux de maintenance est informatisée et automatique est nécessaire lors de l’analyse de la faisabilité du projet de maintenance 4.0. L’informatisation et l’automatisation font partie des éléments essentiels afin d’optimiser le temps de constat ou de réalisation de l’existence d’un problème sur un équipement. Si les alertes et les demandes de travaux ne sont pas informatisées, il serait nécessaire de savoir si cette documentation est existante et si les informations qui y figurent sont fiables et exploitables. Dans le cas où on aurait déjà un système informatisé, il ne resterait plus qu’à évaluer sa compatibilité et son intégration dans les nouvelles installations 4.0. Les questions à se poser en ce qui concerne l’étude des moyens d’alerte et demande des travaux de maintenance sont les suivantes :

- **Quelle est la fréquence de demande des travaux ?**

La réponse à cette question nous permet de mettre l’accent sur les dates auxquelles les travaux se font régulièrement afin de se focaliser l’enregistrement et l’analyse des données pendant ces événements dans le cas où on n’aurait pas des références de données numériques exploitables pour l’apprentissage de nos algorithmes. Avoir des informations datées sur tous ces événements nous permettrait de construire une statistique structurée qui pourrait servir plus tard comme modèle d’apprentissage et d’alerte pour les maintenances préventives et correctives.

- **Quelles sont les demandes de travaux et les alertes les plus récurrentes ou redondantes ?**

Prendre connaissance des demandes de travaux les plus récurrentes pourrait constituer une base de données pour mettre l’attention dessus lors de choix des valeurs critiques pouvant provoquer le déclenchement des alarmes.

- **Quel est l’organigramme d’assignation des alertes et des travaux de maintenance ?**

Cette question est importante pour savoir où et à qui acheminer chaque niveau ou type d’alerte. Ça permet aussi de savoir comment configurer l’interface d’assignation des requêtes

d'incidents ou de demandes de services de notre système de maintenance 4.0 et même dans le programme des algorithmes d'apprentissage.

2.2.6 Processus de validation et d'approbation des travaux de maintenance

La validation des travaux de maintenance et la sauvegarde des informations qui en découle sont très souvent négligées et pas prises en considération dans la réalisation des travaux futurs ou la gestion de la maintenance de façon globale. Quelques questions qu'on pourrait se poser pour évaluer ces étapes du processus sont les suivantes :

i. Comment les travaux de maintenances sont-ils validés ?

Pour répondre à cette question, il est important de se renseigner sur les outils qui sont utilisés pour valider les normes électriques ou électroniques des équipements après la maintenance ou pour valider les procédures des maintenances et les rapports de maintenance. Pour les procédures et les rapports de maintenance, il pourrait être aussi nécessaire de vérifier que les informations utiles et nécessaires pour assurer un bon suivi y sont entrées.

ii. Est-ce que ça se fait avec un rapport papier ?

Le rapport papier a été pendant très longtemps l'une des techniques les plus utilisées pour le stockage des données ; mais aujourd'hui il devient de plus en plus dépassé et l'une des informations dont pourrait s'enquérir au prêt de la compagnie pour passer au 4.0 serait de savoir quelles sont les méthodes et les procédures de stockage des données et quelles sont les informations qui y sont sauvegardées.

iii. Est-ce qu'il y a un système de détection des erreurs de procédures ou autres lorsqu'un rapport de travaux est effectué ?

Détecter les erreurs de procédures où les erreurs dans l'exécution des travaux de maintenance pourraient éventuellement être une étape importante vers le 4.0 ; bien que cette étape ne soit pas forcément intégrée dans ce cheminement. Dans la mesure où on serait face à une entreprise qui souhaiterait y intégrer cette façon de faire dans leur processus, on leur poserait la question de savoir s'ils sont déjà pris en considération dans leurs procédures de travail et s'il en tire des

données qui pourrait être exploitées dans nos algorithmes pour améliorer l'efficacité de la maintenance.

iv. Quels sont les outils d'évaluation des travaux de maintenance (par exemple statistique ou non statistique) ?

Les outils de maintenance pourraient être des moyens par lesquels les employés de maintenance seraient contraints d'uniformiser leur façon de faire pour arriver au même résultat. Cette uniformisation vers le 4.0 pourrait passer par la vérification de l'existence des outils d'évaluations des travaux de maintenance ; ce qui pourrait les guider vers une façon de travailler quasi similaire. On ne saurait sans doute proposer cette façon de faire sans vérifier que les rapports de maintenance des entreprises sont informatisés afin de pouvoir garder facilement une traçabilité ou de rendre numériquement exploitables ces données contenues dans ces rapports.

2.3 Études préliminaires du processus de transformation des données de maintenance

La transformation des données est un processus essentiel pour la migration d'un système de maintenance vers le 4.0. Une étude préliminaire voudrait qu'on se pose les bonnes questions et qu'on recueille les informations nécessaires pour mettre en place un système efficace et qui nous permettraient l'exploitation la plus efficace de la technologie, des ressources et des données. Une des façons de veiller à ce qu'on ait le bon cheminement pourrait être de se poser les bonnes questions sur la sélection des algorithmes et de suivre l'arbre décisionnel préétabli.

2.3.1 Procédé de sélection des algorithmes de traitement de données de maintenance

Le choix des algorithmes d'analyses et de traitement des données de maintenance pourrait être séparé en deux étapes. Celles de la planification, de la sauvegarde des données et de l'exploitation des données. Les questions que nous avons sélectionnées pour bâtir notre guide de choix d'un algorithme de maintenance sont issues des grandes lignes de questionnements que nous avons trouvés dans la revue littérature des articles de maintenance au chapitre 1. Nous avons aussi constaté que l'essentiel des questions qui étaient posées dans la revue de littérature des algorithmes de maintenance concernait deux grands axes à savoir : la sauvegarde de données et l'exploitation des données. De ces deux grands axes, nous avons pu identifier des

questions qui revenaient le plus souvent dans la revue de littérature, comme on peut le voir dans les sous-sections suivantes.

2.3.1.1 Sauvegarde des données

La sauvegarde et la validation des données sont des étapes préalables à leurs transformations pour être exploitées dans des algorithmes de maintenance. Pour atteindre l'objectif d'une sauvegarde conforme des données pour leurs futures exploitations ; il pourrait être nécessaire de savoir :

- **S'il existe déjà des données qui ont été sauvegardées**

Savoir s'il existe au préalable des données qu'une compagnie avait sauvegardées avant d'avoir le projet d'implémentation d'une maintenance 4.0 ; devrait servir à déterminer si elles sont exploitables et si elles pourraient servir dans la construction d'un modèle de données de maintenance. Si les données sont non existantes, non conformes, insuffisantes ou non exploitables ; avoir ces informations permet de planifier et de mettre en place un modèle de sauvegarde des données adéquates, suffisantes et représentatives des équipements qui permettraient de construire un système de maintenance 4.0 efficace et utile.

- **Le type de donnée sauvegardée**

La définition du type de donnée sauvegardée ou à sauvegarder sont des informations qui pourraient être nécessaires à recueillir pour choisir la façon dont elles seront valorisées, de définir les résultats finaux qui seront interprétés, de simplifier leurs lectures par des applications simples ou complexes ; d'intervenir dans le choix des capteurs et des objets connectés afin de définir comment la communication se fera. Avoir des informations sur le type des données pourrait servir aussi à définir les méthodes statistiques qui seront utilisées pour le traitement et l'analyse de données de performances et de maintenance des équipements.

- **La taille des données qui sont sauvegardées**

La taille des données dans le processus de mise d'un système de maintenance 4.0 est un facteur qui n'est pas contraignant, mais qui peut être utile de prendre en considération. Avoir une

information sur la taille des données qui sont sauvegardées dans le cas où elles existent au préalable ou qui vont être sauvegardées permet d'estimer si ces données seront suffisantes et représentatives pour être utilisées comme référence dans le modèle d'entraînement de données. L'estimation au préalable de la taille des données pourrait aussi être utile dans l'achat et la communication entre les objets interconnectés.

- **La validité et la conformité des données sauvegardées**

Si les données utilisées pour la construction d'un modèle de données ne sont pas valides et conformes ; il serait important d'intégrer dans notre algorithme des procédés de validation et de correction afin d'éviter que l'on compare de nouvelles données à un modèle de données plein d'erreurs et non représentatif. Il pourrait aussi être important de tenir compte de ces notions afin de ne pas classer les nouvelles données dans le mauvais groupe.

- **Sur quelle durée les données ont été sauvegardées**

En plus de la validité et de conformité, des données, la quantité de données et la durée sur laquelle elles sont enregistrées permettent d'obtenir un échantillon représentatif de l'usure des machines à long terme. À moins d'avoir déjà au préalable un historique des données du dysfonctionnement et de l'usure des équipements, il serait important de mettre en place un mécanisme qui permettrait de les enregistrer sur durée de temps considérable et représentative de l'usure des équipements. Une autre option serait aussi de trouver un moyen de concevoir une simulation de l'usure des équipements sur une courte durée, mais permettant d'avoir des données qui en situation habituelle prendraient plusieurs années à obtenir. La durée sur laquelle les données ont été sauvegardées pourrait faire varier l'algorithme qui sera utilisé pour le prétraitement, l'entraînement et le traitement des données ; car certaines méthodes statistiques ou de classification peuvent nécessiter ou pas un volume de données considérables et représentatives de l'usure des équipements sur une longue durée.

2.3.1.2 Exploitation des données

La sauvegarde et la validation des données sont des étapes préalables à leurs transformations pour être exploitées dans des algorithmes de maintenance. Pour atteindre l'objectif d'une

sauvegarde conforme des données précédentes pour leurs futures exploitations ; il pourrait être nécessaire de savoir :

i. À quelle fréquence va-t-on enregistrer les données ?

Pour être sûre que c'est la même quantité de données qui transite et qui est envoyée de façon synchrone. Ça aura aussi un impact sur la vitesse de traitement des données de l'algorithme, car après avoir entraîné notre modèle de données, chaque donnée qui sera ensuite recueillie et comparée directement avec le modèle de données d'apprentissage pour savoir à quel groupe appartiendra la nouvelle donnée. Si les données ne sont pas envoyées à la fréquence voulue au préalable, on va observer une lenteur au niveau du traitement et de l'analyse de données, ce qui pourrait avoir une incidence sur l'efficacité du modèle de maintenance 4. 0.

ii. À quelles fins seront utilisées les données sauvegardées ?

La sauvegarde des données est aujourd'hui un des aspects importants pour les entreprises, mais à cause de la capacité des supports de sauvegarde qui ne peuvent pas être infinis ; elles sont parfois obligées de sélectionner les données à sauvegarder en fonction du fait qu'elles auront des fonctions ou des utilisations futures. Pour savoir quel type de donnée sauvegarder, on pourrait par exemple poser la question pour savoir si elles seront utilisées pour une interprétation, une correction de valeur, une rétroaction, une maintenance à temps réel ou une maintenance après analyse.

iii. Sous quelles formes seront retournées les données traitées ?

Une fois les données sauvegardées, il serait important de savoir si elles doivent être transformées ou traitées avant d'être sauvegardées ou si elles seront sauvegardées seulement pour l'analyse des données. Il pourrait être aussi important de savoir si les données sont sauvegardées sous forme booléenne, numériques, de caractères, de données entières, décimales, de données codées, des données binaires, temporelles, etc. Car ceci pourrait exercer une influence sur l'espace mémoire à réserver pour cette tâche.

iv. Comment est-ce que les données pourraient être interprétées ?

Chaque algorithme de traitement de données est relié à une méthode de calcul spécifique et il pourrait être nécessaire de savoir si les données seront interprétées dans un même algorithme, si l'interprétation sera faite à la fin ou à certaines étapes du traitement données ; et si les données sont interprétées de façon numérique avant de retourner un résultat ou elles sont interprétées de façon visuelle. Tout ceci pourrait permettre d'anticiper sur le choix

d’algorithme de prétraitement et de traitement de données, car leur processus pourrait différer selon la façon dont les étapes de traitement des données seront planifiées.

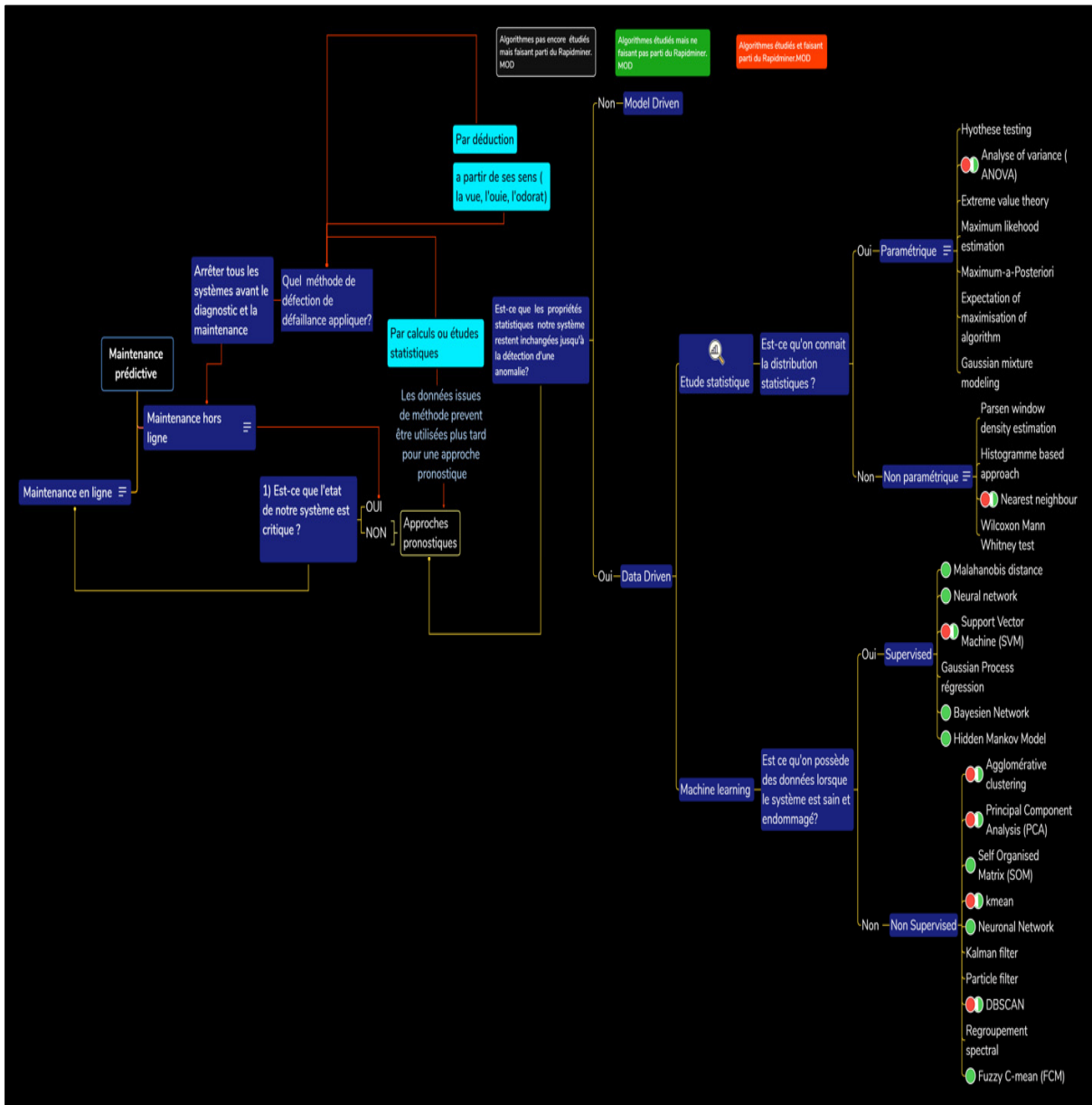


Figure 2.5 Arbre de décision du choix d’un algorithme de traitement de données (Cas de driven)

La liste des algorithmes que nous avons utilisés pour créer notre organigramme de choix des algorithmes n’est pas exhaustive. Nous avons combiné dans cette liste de choix, les algorithmes

utilisés dans les articles que nous avons passés en revue, ceux de l'application Rapidminer, un choix de quelques algorithmes de maintenance trouvés grâce à nos recherches sur internet et les algorithmes des autres articles passés en revue qui n'ont pas été jugés pertinents pour être mis dans la revue de littérature. Les réponses aux questions de ce guide sont basées sur majorité des réponses aux questions que nous avons trouvées dans la revue de littérature. La liste des options de réponses aux questions du guide n'est pas exhaustive, mais leur choix a été fait selon les réponses majoritaires et récurrentes dans la revue de la littérature.

2.3.2 Arbre décisionnel de choix d'un algorithme de traitement des données de maintenance

Cette section décrit quelques exemples de la façon dont on pourrait procéder pour choisir les algorithmes qui pourraient être utilisés pour le traitement de données. Il est important de mentionner qu'il existe déjà des outils pour aider à faire un choix au niveau de la sélection d'un algorithme de traitement de données : Rapidminer MOD ; Autosickit learn, Matlab, etc. Nous avons quand même tenu à mettre en place notre propre arbre décisionnel pour présenter aux vues de nos recherches la façon dont nous appréhendons la sélection et le choix d'un algorithme de traitement des données de maintenance.

Dans l'arbre décisionnel de la figure 2.1, nous avons dressé une liste de certains algorithmes qui peuvent être utilisés pour le traitement des données de maintenance. Pour dresser cette liste qui n'est pas exhaustive, nous avons utilisé rapidminer MOD, qui est une application permettant de choisir un algorithme de traitement de données de maintenance en fonction des paramètres présélectionnés par l'utilisateur lui-même. Nous avons identifié les algorithmes cités ci-dessus pour distinguer ceux qui ont été étudiés au chapitre 1 de notre mémoire, ceux faisant partir de rapidminer et ceux n'en faisant pas partir. Cette distinction a été faite pour faciliter la recherche d'information sur les algorithmes ci-dessus au cas où le lecteur voudrait avoir plus de détails ; mais l'arbre décisionnel lui-même permet de guider l'utilisateur sur le choix de l'algorithme optimal de traitement de données de maintenance en fonction de sa situation de maintenance.

L'arbre décisionnel de la figure 2.2 fait allusion uniquement à une maintenance préventive, c'est-à-dire une maintenance qui est faite dans le but d'éviter une éventuelle panne qui causerait l'arrêt d'un équipement. Cet arbre décisionnel de maintenance préventive peut être divisé en deux grandes parties :

- **Maintenance en ligne**

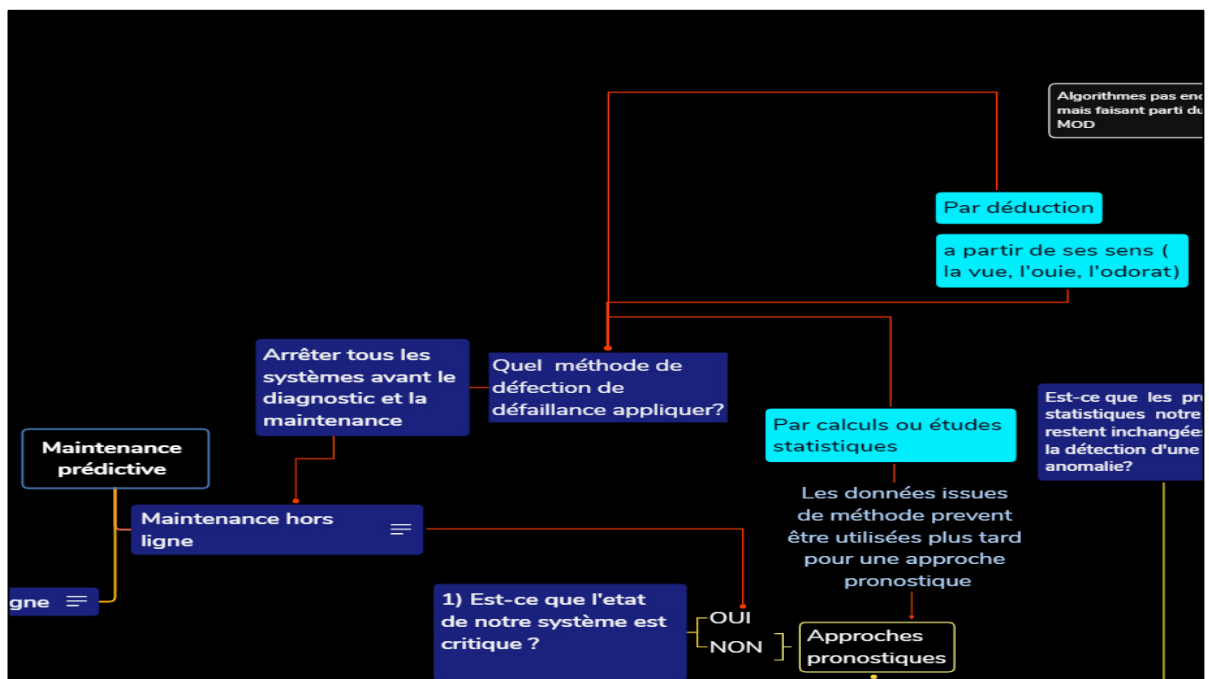


Figure 2.6 Zoom sur la maintenance hors ligne (non connectée)

Comme on peut le voir sur la figure 2.6, la maintenance hors ligne est une approche de maintenance préventive qui consiste à déconnecter ou mettre en arrêt pendant un temps bref des équipements pour effectuer une maintenance lorsqu'on remarque une anomalie qui pourrait causer plus tard un dysfonctionnement permanent ou lorsque la période d'entretien est proche. Les lignes en rouge sur la figure 2.6 ci-dessus permettent de décrire les potentielles étapes d'une maintenance préventive hors réseau. Il s'agit ici d'arrêter tous les systèmes avant d'effectuer le diagnostic final par différentes méthodes, soit :

a. Par déduction

Cette méthode nécessite une expertise de l'intervenant qui devra utiliser son expérience et ses connaissances pour trouver le problème et le résoudre avant qu'il ne cause une panne nécessitant l'arrêt d'une durée prolongée d'un équipement.

b. À partir de sens (la vue, l'ouïe, l'odorat)

Cette méthode nécessite aussi que l'intervenant ait une certaine expertise, mais peut aussi être utilisée par un intervenant moins expérimenté, précisément lorsqu'il s'agit d'une anomalie presque détectable à première vue.

c. Par calculs ou études scientifiques

La donnée est une information essentielle pour cette méthode. Selon les événements ou les erreurs qui pourraient se produire sur des équipements, on aura des enregistrements ou retours de données qui refléteront les pannes ou les erreurs produites. Les informations recueillies sur des équipements lors des dysfonctionnements ne causant pas nécessairement des pannes vont être analysées au fur et à mesure par des calculs (moyenne, écart-type, écart moyen, etc.), des comparaisons, le calcul des valeurs finales d'une formule à partir des données recueillies lors des dysfonctionnements. Toutes les valeurs obtenues par calculs, comparaison ou déduction seront analysées plus tard pour vérifier qu'elles respectent certaines normes ou grandeurs physiques. Ainsi on pourrait donc anticiper sur d'éventuelles pannes qui pourraient arriver et mettre le système en arrêt pour résoudre les pannes avant qu'elles ne rendent un équipement dysfonctionnel sur le long terme ou complètement irrécupérable.

Il est important ici de mentionner que la manipulation des données et les analyses ne se font pas directement sur l'équipement lorsqu'il est en fonctionnement. Les données brutes (provenant de capteurs, etc.) sont recueillies pendant le fonctionnement d'un équipement, mais analysées et interprétées en dehors de cet équipement avant de tirer une conclusion sur la nécessité d'effectuer une maintenance prédictive. Les données recueillies de cette méthode pourraient aller aux archivages et être réutilisées plus tard dans une maintenance en ligne.

- **La maintenance en ligne**

La maintenance prédictive en ligne est le plus souvent utilisée pour des systèmes dont l'état n'est pas critique, si c'est le cas de la solution qui pourrait la plus adéquate serait la maintenance prédictive hors ligne ou hors réseaux. La maintenance en ligne est essentiellement basée sur l'exploitation des données et consiste à effectuer une acquisition de données, analyse, interprétation sur un système sans le mettre hors réseaux (hors de fonctionnement). Après avoir vérifié que l'état de notre système n'est pas critique et ne nécessite pas une intervention immédiate, on pourrait aussi considérer dans l'approche pronostic d'utiliser des données préalablement utilisées dans une maintenance hors ligne pour entraîner notre système et effectuer un diagnostic.

La mise en application de la maintenance prédictive en ligne nécessite le choix d'un algorithme de traitement de données de maintenance efficace et adapté au système sur lequel on aimerait implémenter une maintenance prédictive. Le choix de cet algorithme dépend du fait que les données issues de notre système restent inchangées ou pas. Si on se retrouve dans le cas de figure où elles changent, on fera recours ici à des algorithmes qui seront utilisés pour implémenter des logiciels de maintenance selon les modèles de données (Model Driven, Figure 2.1) ; c'est-à-dire qui ne dépendent pas de la plateforme et du système sur lequel ils sont implémentés, mais qui peuvent être universels et utilisés sur certains systèmes différents. Dans le cadre de notre mémoire nous n'allons pas aborder cet aspect étant donné que la maintenance prédictive que nous avons étudiée est celle qui est basée essentiellement sur une mise en œuvre d'un modèle construit grâce à l'historique de données équipements ou système qu'on étudie (Data driven). Comme on peut le voir sur la figure 2.2, nous avons classé certains des algorithmes pouvant servir à la construction des logiciels (Data Driven) en deux groupes selon :

- L'étude statistique**

C'est l'une des options de la méthode de construction d'un modèle piloté par les données (Data Driven) permettant de construire des logiciels de traitement et d'analyses de données de maintenance. Elle peut être segmentée en deux sous-catégories selon le fait que l'on connaît ou pas la distribution statistique : l'étude statistique paramétrique et non paramétrique. L'étude

statistique paramétrique est basée sur le calcul de moyenne, écart-type et autres paramètres statistiques qui regroupent les algorithmes dont on connaît la distribution statistique. Si la distribution n'est pas bonne, on aura une mauvaise estimation et détection des anomalies après les calculs.

L'étude statique non paramétrique quant à elle n'est pas basée sur des calculs à partir des données finies, mais plutôt sur des calculs basés sur modèle décrit par un nombre infini de paramètres (on peut voir quelques-uns de ces algorithmes qui sont sur la figure suivante). Cette étude statistique nécessite aussi au préalable qu'on ait collecté les données de maintenance du dispositif défaillant afin d'avoir une référence par rapport aux données non statistiques du dispositif non défaillant lors de la comparaison.

b. L'apprentissage automatique

Par opposition à l'étude statistique, la conception des algorithmes d'apprentissage automatique ne nécessite pas forcément qu'on ait les données des dispositifs défaillants et non défaillants. On peut les séparer en deux sous-catégories en fonction du fait qu'on possède des données endommagées ou pas du système de référence. L'apprentissage automatique supervisé (supervised machine Learning) est dirigé par le fait qu'on possède en avance des données identifiables de maintenance des dispositifs défaillants, qui seront utilisées comme exemples annotés pour construire un modèle de prédiction. L'apprentissage automatique non supervisé est désigné dans le cas de figure où les données n'existent pas ou ne sont pas identifiables ; il consiste à créer des groupes et des sous-groupes en classifiant les données présentant des caractéristiques semblables pour former notre modèle intelligent de données qui servira plus tard à identifier les défaillances de notre système de référence.

2.4 Déploiement d'un modèle de maintenance 4.0 : Analyse préliminaire.

La maintenance 4.0 est un concept novateur qui est plus souvent associé à l'intelligence artificielle et à l'internet des objets. Nos missions à la station d'épuration des eaux usées de Montréal et à l'hôpital Honoré-Mercier ont été dans ces deux sites d'observer leurs méthodes de maintenance déjà existantes et de trouver le moyen de les améliorer. Les aspects importants à inspecter pour ces deux sites étaient, la technologie, le processus et les méthodes de travail.

Le but de la transition vers les 4.0 est de pouvoir effectuer des améliorations quantifiables directement ou indirectement du processus ou des opérations de maintenance sur plusieurs aspects :

i. La vitesse

La vitesse est un des éléments qu'il serait important d'accroître dans un processus de maintenance prédictive, il s'agirait ici de la vitesse d'exécution des travaux de maintenance avant qu'un équipement ne tombe en panne, mais aussi de la vitesse d'analyse et de traitement de données.

ii. L'efficacité

La transition vers le 4.0 est un processus qui devrait un être mis en place dans le but d'améliorer l'efficacité de la maintenance dans un hôpital ou une industrie.

iii. La gestion des ressources

La traduction de l'efficacité d'efficacité d'un système de maintenance 4.0 pourrait se traduire par la possibilité de bien gérer l'ensemble des ressources (temps, le personnel, les logiciels, le matériel didactique, les formations, etc.) dont on dispose afin d'améliorer les services fournis.

iv. La gestion de finances

L'ensemble des méthodes mises en place pour faire une transition vers la maintenance 4.0 ne concerne pas toujours le volet innovation, mais aussi le volet économique. Effectuer des améliorations au niveau de la maintenance permet dans beaucoup de cas de figure de prévenir et d'éviter des pratiques qui feraient perdre de l'argent à une entreprise.

Le positionnement de la maintenance 4.0 dans le projet de la station d'épuration des eaux usées et celui de l'hôpital Honoré-Mercier que nous avons observé pourrait être aussi de redéfinir des méthodes de travail avec l'apparition des nouveaux logiciels, l'intégration des objets intelligents, la valorisation des données, l'éducation et la formation du personnel.

2.5 Outils d'aide à la réalisation d'une Feuille de route pour l'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0

En s'appuyant sur un ensemble de critères de succès et d'échecs d'un projet de maintenance numérique listé au chapitre 1 (tableau 1.4) et sur un outil d'évaluation de la maturité numérique ; on serait capable d'identifier les lacunes et le niveau actuel de préparation d'une organisation, afin de définir une feuille de route qui servirait à les guider tout au long de la transformation.

La feuille de route contribuerait à aider les organisations à comprendre la stratégie de transformation en compagnie agile et d'autoapprentissage ; ainsi que l'importance d'adopter et d'implémenter un modèle de la maintenance 4.0. Elle serait aussi indispensable à avoir une visibilité globale sur la façon dont les changements dans les différents domaines seront agencés et opérés. Elle contribuerait aussi à convaincre les différents groupes ou parties prenantes au projet sur sa faisabilité, sur les périodes pendant lesquelles elles devraient intervenir et les ressources qu'elle devrait mettre à disposition.

Comme on peut le voir dans la figure 2.7 du modèle Acatech, pour produire une feuille de route d'une maintenance numérique, il faudrait commencer par :

- Définir la stratégie de l'organisation,
- Lister les technologies et les systèmes déjà implémentés ou à implémenter.

Après avoir défini les éléments d'entrées pour établir notre feuille de route, on va procéder à une analyse méthodologique du projet de maintenance 4.0 en définissant les éléments suivants :

- Les bénéfices attendus,
- Les ressources ou capacités manquantes,
- Les ressources ou capacités déjà acquises, disponibles et opérationnelles,

- Les analyses des écarts.

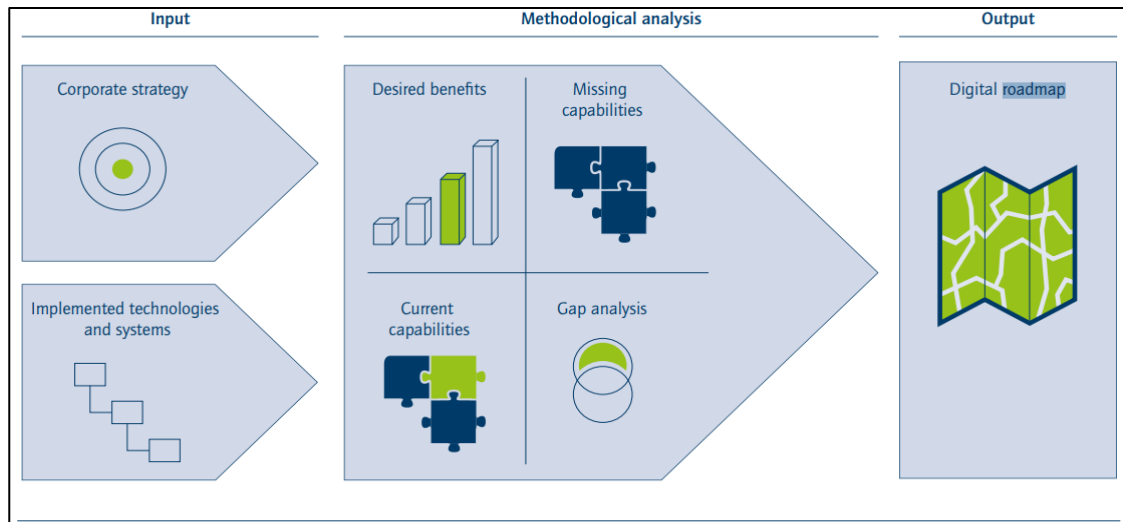


Figure 2.7 Méthodologie d'introduction d'une feuille de route dans un processus d'industrie 4.0

Tirée de Günther Schuh (2017, P. 16)

Le modèle développé sur la figure 2.7 pour établir cette feuille de route était destiné au domaine de la transformation numérique des organisations, mais il peut aussi être adapté à un contexte de maintenance 4.0. L'analyse des écarts permettrait d'évaluer à chaque étape de progression le respect des périodes et des réalisations planifiées, afin de pouvoir effectuer des ajustements. Il faudrait garder à l'esprit qu'une feuille de route ne devrait pas être rigide et pourrait évoluer avec les temps.

L'étude préliminaire à l'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0 proposée dans ce chapitre nous a permis de développer des outils d'évaluation de la maturité numérique d'une organisation. Cet outil nous a permis de lever le doute sur l'élément qui aurait le plus d'influence sur l'organisation et sur lequel on devrait se pencher en priorité lorsqu'on voudrait faire évoluer le niveau de maturité d'une organisation. Nous avons aussi présenté une méthode d'exploration des données existantes, d'aide au choix de l'algorithme intelligent et de planification des systèmes à accueillir et à exploiter les nouvelles données.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons recensé quelques éléments pouvant aider à l'établissement d'une feuille de route afin de comprendre la stratégie de transformation de l'organisation. Les cas pratiques sur lesquels nous nous sommes penchés ensuite devraient nous permettre d'expérimenter les outils et méthodes développées.

CHAPITRE 3

VIGIE TECHNOLOGIQUE ET MÉTHODOLOGIE D'AMÉLIORATION DU SYSTÈME DE MAINTENANCE EXISTANT : CAS DE LA STATION D'ÉPURATION DES EAUX USÉES

Dans le chapitre précédent, nous avons constaté que la culture, les valeurs partagées, la stratégie, la structure et les décisions faisaient des éléments à examiner en premier lors de l'évaluation de la maturité d'une organisation. Notre travail ici consistera à identifier les composantes de l'organisation à analyser qui seraient directement en lien avec les éléments qu'on vient de citer. Afin de cibler les composantes reliées à ces éléments, nous commencerons par effectuer une vigie technologique du premier cas pratique de notre étude, afin de nous imprégner et d'avoir un état de l'existant. À partir de cette vigie technologique, nous pourrions faire quelques recommandations directes qui permettraient à l'organisation de se mettre à niveau afin d'être en mesure de remplir les conditions nécessaires pour accueillir un modèle de maintenance 4.0.

3.1 Vigie technologique pour l'étude de la transformation numérique : Cas de la station d'épuration des eaux usées de Montréal

3.1.1 Principe de fonctionnement de l'usine

L'usine d'épuration des eaux usées de Montréal est subdivisée en deux sections d'arrivée des eaux, une arrivée nord et une arrivée sud. Chaque secteur d'arrivée des eaux usées est identifiable par des codes de couleurs qui permettent de savoir de quelle partie de la ville de Montréal proviennent les eaux usées.

Le processus de traitement des eaux dure environ 2 h et il peut être subdivisé en plusieurs étapes à savoir :

i. Le filtrage des déchets solides

Cette étape est constituée des sous-étapes suivantes :

- le filtrage (il consiste à enlever de l'eau les gros déchets qui pourraient causer une panne lors du processus d'épuration de l'eau),
- la décantation (elle consiste à laisser reposer l'eau pendant quelques heures pour enlever les grosses particules de sable),
- l'essorage (il consiste à enlever le maximum d'eau possible des déchets afin de faciliter et réduire la durée du processus d'incinération),
- le tri (consiste à trier les grosses particules des déchets),
- l'incinération (consiste à brûler les déchets solides pour en extraire de l'eau).

ii. Le traitement de l'eau

Après le tri et l'incinération des déchets solides, les eaux sont traitées par des produits spéciaux qui permettront de la rendre potable.

iii. L'analyse de l'eau traitée

L'eau épurée est analysée afin d'évaluer sa qualité avant d'être reversée dans la mer.

Tout ce processus de traitement nécessite une arrivée d'air pour propulser l'eau à travers les tuyaux entre les différentes étapes du traitement. Dans la salle d'arrivée d'air, on dispose aussi d'un moyen d'évacuation du trop-plein d'eau en cas d'urgence. Pour que l'usine fonctionne, elle a besoin d'une quantité importante d'électricité qui provient à la fois d'un fournisseur d'énergie et d'une production locale. L'énergie locale produite est utilisée en cas de manque d'énergie ou d'urgence ; quant à celle qui est produite par l'incinération elle est utilisée directement pour le reste du processus d'incinération.

L'incinérateur a besoin pour fonctionner d'un apport d'énergie externe pour partir quelques étapes du processus d'incinération, mais une fois la quantité de chaleur suffisante pour produire sa propre énergie, il va s'autoalimenter. En ce qui concerne l'approvisionnement des pièces de

rechange, l'usinage, la fabrication et la retouche des certaines pièces détachées sont faits sur place. Il nous a été demandé après cette tournée générale d'effectuer une visite ciblée du secteur 654 et 656 (qui est des secteurs les plus problématiques) afin d'appréhender les changements qui pourront améliorer son fonctionnement.

3.1.2 Secteur 656 des pompes à boues

Nous avons effectué plusieurs visites guidées à la station d'épurations des eaux usées de Montréal afin de maîtriser le processus global d'assainissement des eaux. Dans le cadre du projet de transformation numérique de la station d'épuration des eaux usées de Montréal et après ciblage des zones prioritaires à étudier, nous avons effectué une visite le 29 septembre 2020 du secteur 656 des pompes à boues.

Cette tournée s'est faite afin de pouvoir identifier les indicateurs permettant de définir l'état des pompes à boues des décanteurs. La section des pompes à boues pour décanteurs à boues comporte 16 pompes. Elles sont vérifiées toutes les fins de semaine pendant le jour et le weekend de préférence. Nous nous sommes rendus sur place pour effectuer une vigie de la technologie, du processus de maintenance et des logiciels de ce secteur.

3.1.3 Processus de maintenance et équipements industriels

Pour faire fonctionner le secteur 656, il faut arrêter toutes les pompes et les redémarrer une à la fois et rapporter si tout est correct avant de les remettre en marche. Les informations à noter dans les fiches des suivis sont notamment le numéro de la composante de la pompe, la donnée affichée au niveau du totaliseur, la pression de référence (en kPa), le débit mesuré (en m³/h), le débit de mesure (m³/min), Lecteur de densimètre (R.T %). Pour chaque mesure il faut vérifier que les valeurs affichées par ces indicateurs sont dans les plages normales de fonctionnement de pompes ; sinon il faudrait rédiger une demande de service pour régler le problème.

En plus de ces mesures à vérifier, il faudrait aussi faire appel à ses 5 sens pour vérifier si on remarque une présence de chaleur, de vibration ou de bruits anormaux et les inscrire aussi dans la demande de service.

Certaines pompes peuvent être relayées par une autre de secours si elles ne fonctionnent pas correctement. La pompe de secours est utilisée uniquement lorsque la principale ne fonctionne pas et qu'il faut compter entre 4 à 6 mois pour recevoir une pompe en réparation.

Le logiciel utilisé ensuite pour l'entrée de données est SICO de PI. Une fois les données entrées dans le système, il ensuite faudrait transmettre le formulaire complété par FAX au RDO au bâtiment des boues (06680), à Rémy Beaudry (06567) et garder une copie de l'original de la fiche de tournée. Si une demande de travaux est nécessaire, il faudrait la faire à partir de MAXIMO.

La station reçoit en moyenne 15 à 20 demandes de service par 24 h, ce qui représenterait une moyenne de requêtes par mois située entre 420 et 620. Ce nombre important de requêtes par mois pourrait justifier le besoin de transformation numérique afin de rendre la sauvegarde des données et les demandes de travaux moins manuels et aussi d'automatiser certaines procédures pour rendre efficace le fonctionnement de ce secteur et économiser au niveau des coûts.

Nous étions aussi censés effectuer la tournée de la section 654, mais faute de temps nous n'avons pas pu nous y rendre. En revanche il nous a été remis la documentation papier nécessaire pour cette tournée.

3.1.3.1 Ressources logicielles et processus de traitement des données de la maintenance

Le type de maintenance prédominant à la station d'épuration des eaux usées est la maintenance corrective. La majorité des actions de maintenance préventives sont constituées des tournées d'inspection. Les bases de données Pi et Maximo sont utilisées pour stocker et analyser les données provenant de ces tournées d'inspection.

À l'entretien, on travaille au niveau de l'inspection pour ressortir les pannes identifiables grâce à l'analyse des données des tournées d'inspection. L'équipe d'entretien la fait du lundi au jeudi, pour les autres jours on peut les faire travailler en cas d'urgence. Le service d'entretien s'occupe aussi des sous-traitants et est parfois amené à transmettre des demandes spécifiques à l'atelier d'amélioration IN120.

La planification d'une maintenance corrective est basée sur des demandes d'intervention provenant des tournées d'inspection. Chaque demande d'intervention provient d'un cheminement bien précis et continue de suivre un cheminement précis jusqu'à sa réalisation. Maximo peut ressortir aussi la disponibilité et le statut de chaque employé dans la station pour planifier la constitution de l'équipe afin que les opérations de maintenance soient bien coordonnées.

Le système de gestion de base de données utilisé par Maximo est oracle et il permet d'exporter des tableaux Excel pour une utilisation ultérieure. La version de Maximo utilisée par la station est Maximo Asset Management 7.6.1.1 qui est l'une des plus récentes et les mises à jour se font régulièrement. Maximo Anywhere est l'un des modules de Maximo qui permet de brancher des appareils mobiles sur Maximo. Il peut servir pour le développement des applications et est actuellement utilisé par leur magasin.

STI mail est un autre module de Maximo qui permet d'envoyer des fax ou des courriels à l'extérieur. Il est utilisé au niveau de l'approvisionnement.

Les inspections sont planifiées en avance et parfois par des sous-traitants, mais ce sont les opérations qui sont la priorité dans le processus de maintenance.

Après ces visites guidées et nos analyses du fonctionnement de l'usine et des secteurs où il nous a été demandé d'accorder une attention particulière, nous avons établi une liste de recommandations des améliorations à effectuer pour rendre intelligent l'acquisition des données du secteur 656, à savoir :

- Installer des capteurs des températures et de vibrations à la place d'utiliser ses 5 sens qui peuvent être trompeur pour détecter des anomalies,
- Entrer les données de façon manuelle dans une tablette pour éviter le stockage papier,
- Relier directement l'entrée de données au niveau des tablettes avec le système SICOS de PI. L'idée serait juste de faire une mise à jour des données et les calculs nécessaires sur ces données dans le serveur lorsqu'on aura accès à une connexion internet,

- Remplacer éventuellement les capteurs existants par des capteurs plus intelligents à code-barre, ceci pouvant permettre d'éviter la saisie manuelle des données.

3.2 Suggestion d'idées d'amélioration des opérations de maintenance

L'entretien des équipements de cette usine d'épuration passe par des opérations de maintenance. La planification des opérations de maintenance s'effectue une fois que le diagnostic est terminé. La plupart des diagnostics de cette usine sont faits de façon manuelle ou à partir de certaines observations. Cette façon de travailler qui s'est avérée utilisée jusqu'ici n'est pas très efficace. Elle alourdit le processus de diagnostic et augmente le risque d'erreur de diagnostic et le cout des opérations de maintenance.

Il nous a été mentionné lors de notre visite que l'archivage de certaines données de diagnostic se faisait sur des supports papier et que l'historique de maintenance de certains équipements était inexistant.

À partir des préoccupations retenues lors de notre visite, nous avons répertorié quelques tâches qui pourront être effectuées afin d'optimiser les opérations de maintenance :

- Concevoir un système pour l'analyse et le traitement des informations numériques archivées,
- Effectuer un IOT (internet des objets) des outils d'informations n'ayant pas d'enregistrement numérique,
- Concevoir un système d'analyse de données archivées sur papier,
- Dresser un inventaire des informations enregistrées sur support numérique et sur papier,
- Dresser un inventaire des capteurs et outils d'information n'ayant pas d'archivage numérique,
- Continuer de garder une surveillance visuelle sur certains équipements (continuer à collecter certaines données de façon manuelle tout en effectuant un historique, archivage et traitement de ces données de façon numérique),
- Intégrer dans le système de maintenance des options et historiques des demandes de travaux,

- Garder un historique de l'utilisation, de l'état de santé et du remplacement de chacune de pièces détachées,
- Remplacer les capteurs qui communiquent les informations locales par des capteurs intelligents,
- Pouvoir intégrer une photo parmi les types de données possibles à archiver dans le système de gestion de maintenance,
- Pouvoir utiliser un système de code barre pour l'identification des équipements,
- Énumérer Les manquements qui pourraient être détectés au niveau de tournées d'inspection des échantillons de données de 2015 à 2020,
- Recueillir les informations sur le projet en cours pour un compteur et la communication entre PI et Maximo,
- Mesurer des fuites avec des capteurs (surveillance vidéo).

3.2.1 Facteurs à considérer lors de l'amélioration des systèmes de maintenance

Il nous a été rapporté lors de notre visite que les deux principaux outils d'archivages des données numériques utilisés par l'usine étaient Maximo et PY. Maximo étant décrit comme un système de gestion des actifs et PY comme outils de gestion des procédés. L'une des idées émises à propos de ces outils est de pouvoir rendre possible le partage d'informations entre ces deux outils.

Dans le processus de résolution des problèmes il est important de noter que l'usine est en grande partie construite dans le sous-sol et qu'en implantant des solutions et il faudrait tenir compte du fait que la communication entre les différents outils IOT ne sera peut-être pas fluide. Aussi les éléments suivants sont à prendre en considération :

- La station a déjà acheté des tablettes à codes-barres, QR, RFID fournies avec des applications standard. Un des problèmes de ces tablettes est l'utilisation des touches qui ne sont pas assez grandes, l'écran n'est pas adéquat pour une utilisation dans des milieux plus difficiles d'accès,
- C'est le comité des opérations qui va mettre en priorité les demandes de travaux, ce qui pourrait entraîner des délais supplémentaires dans la réalisation de certaines tâches,

- Maximo n'intervient pas dans le processus de tournées d'inspection,
- Maximo Anywere et Every place permettent de se connecter au système Maximo à partir d'un cellulaire,
- Il sera toujours important de faire des tournées d'inspection physiques même si on automatise la détection des anomalies sur les équipements afin d'avoir à temps réel un visuel de l'état de chaque équipement,
- La station d'épuration des eaux usées Maximo va migrer dans quelques années vers un autre site à partir duquel son utilisation sera commune à toutes les stations des eaux de la ville.

3.2.2 Proposition des quelques évolutions futures du projet

Dans un souci de rédaction et d'avancement de mes travaux de mon mémoire, nous avons dû interrompre notre projet sur la présentation d'un processus d'amélioration de la maintenance 4.0 à la station d'épuration des eaux usées de Montréal. Ce projet a commencé un peu avant le début le Covid-19 et cette pandémie a augmenté les délais de visites de certains secteurs de l'usine et des rencontres avec les principaux acteurs. Quelque temps après le début de la pandémie, ce projet avait été reporté à des dates ultérieures comme bien d'autres aussi pour des raisons de budget ; ce qui nous a amenés à choisir un autre secteur d'application même si les objectifs du projet restaient pratiquement les mêmes. Néanmoins avant de choisir un autre domaine d'application pour le projet de mémoire, voici quelques recommandations et actions que nous leur avons suggérées afin de faciliter l'avancement du projet à la station d'épuration des eaux usées une fois qu'il aura repris :

- Énoncer les grandes étapes du processus de transformation numérique,
- Donner un aperçu de leur processus de maintenance (avec comme exemple spécifique les sections ciblées),
- Pour les sections ciblées, définir ce qui se fait actuellement versus ce qui pourrait être amélioré (nos recommandations) pour migrer vers l'industrie 4.0 ; lister les actions qui pour nous seraient source de perte de temps d'efficacité dans leur processus de maintenance,

- Leur présenter la vigie des logiciels et du matériel qui pourrait utilisée pour migration vers l'industrie 4.0,
- Leur faire proposer comment les applications Maximo et Pi pourrait communiquer grâce à une interface,
- Leur proposer d'automatiser la navigation dans les documents du processus de maintenance pour l'équipe de gestion et potentiellement d'autres équipes,
- Accroître l'utilisation de Visual PM qui permet de voir la vue d'ensemble de ce qui est programmé comme action de maintenance,
- Utiliser Maximo pour la facturation et les demandes de travaux effectués,
- Automatiser l'enregistrement des données des différents paramètres des 6 générateurs de la station,
- Remplacer les capteurs existants et les outils d'affichage afin de suivre les paramètres en temps réel : mettre en place un réseau des IoT, Maintenance prédictive,
- Mettre en place un système d'analyse de données historiques afin de les comparer par rapport aux valeurs actuelles, connaître l'état des appareils, et accélérer les décisions,
- Mettre en place, un système permettant d'archiver les différents appareils utilisés et qui n'ont pas été archivées et les relier numériquement, en conséquence, vers aux deux plateformes Maximo ou PY,
- Mettre en place un système de code barre pour l'identification des équipements, ainsi que les pièces de rechange qui lui sont associées afin qu'elles soient géolocalisées et leur état de santé soit connu,
- Réduire le gaspillage du temps, par la perfection de la géolocalisation des différents appareils en intégrant dans chaque appareil, un code-barre et une interface de ces équipements au niveau du centre de contrôle ; ceci permettant d'observer la santé de l'équipement à temps réel,
- Enregistrer les actions de maintenance et les historiques des demandes de travaux,

- Mettre en place un système permettant de valider si les agents ont vraiment réalisé leurs interventions.

La Figure 3.1 ci-dessous donne une idée de la façon dont nous avons prévu les échanges et les collaborations au niveau de ce projet afin d’être efficaces dans la réalisation de nos tâches.

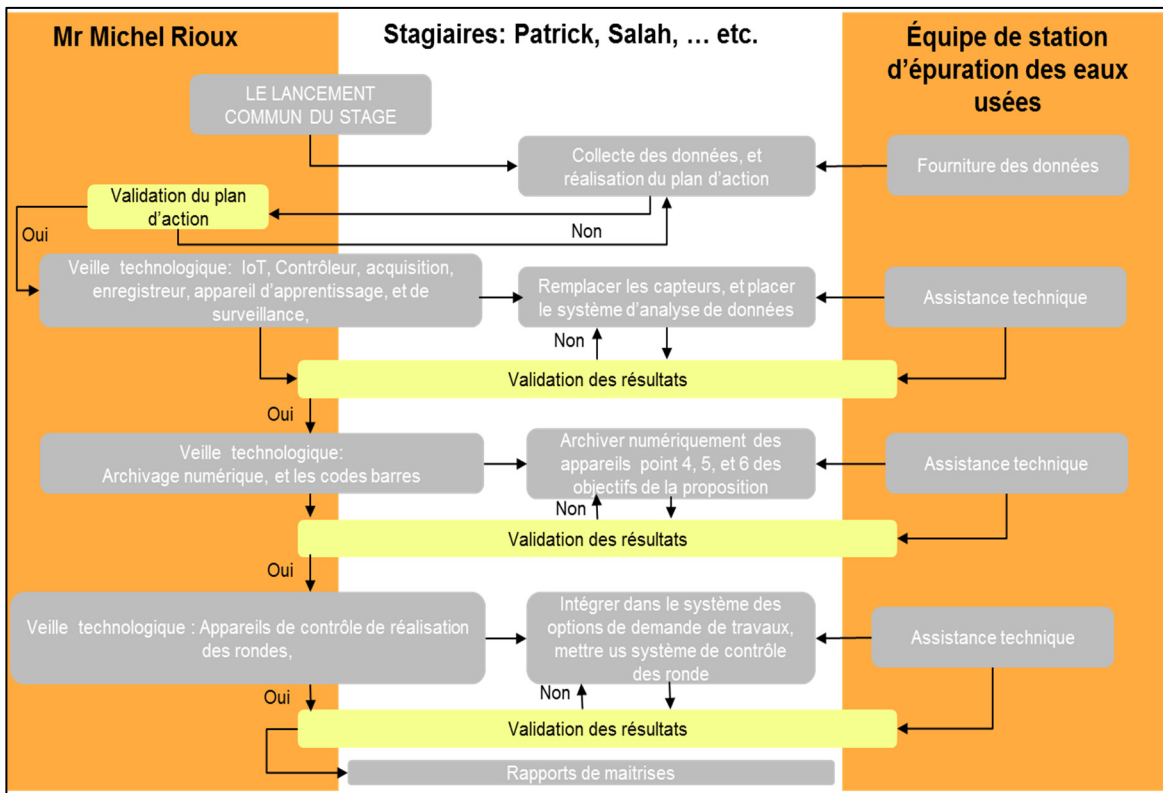


Figure 3.1 Graphique du déroulement de la collaboration au niveau de la réalisation des tâches sur le projet de la station d’épuration des eaux usées de Montréal

L’objectif final dans ce chapitre était d’arriver à une évaluation de la maturité numérique de la station d’épuration des eaux usées, afin d’identifier les éléments sur lesquels agir pour mettre en place un système de maintenance 4.0 efficace. Nous nous sommes limités à la vigie technologique de quelques sections identifiées et à quelques suggestions d’amélioration de la maintenance. Du fait que ce projet a été ajourné, nous n’avons pas pu finaliser nos visites afin d’effectuer une analyse complète, de proposer un choix d’algorithme et une feuille de route.

Étant d'aller au bout de notre analyse complète sur cas de figure, nous nous sommes tournés vers un deuxième cas de pratique, à savoir celui de l'hôpital honoré mercier.

CHAPITRE 4

VIGIE TECHNOLOGIQUE ET MÉTHODOLOGIE D'AMÉLIORATION DU SYSTÈME DE MAINTENANCE EXISTANT : CAS DE L'HÔPITAL HONORÉ-MERCIER

Dans le chapitre 2, nous avons constaté que la culture, les valeurs partagées, la stratégie, la structure et les décisions faisaient des éléments à examiner en premier lors de l'évaluation de la maturité d'une organisation. Notre travail ici consistera à identifier les composantes de l'organisation à analyser qui seraient directement en lien avec les éléments qu'on vient de citer. Afin de cibler les composantes reliées à ces éléments, nous commencerons par effectuer une vigie technologique du deuxième cas pratique de notre étude, afin de nous imprégner et d'avoir un état de l'existant. À partir de cette vigie technologique, nous pourrions faire quelques recommandations directes qui permettraient à l'organisation de se mettre à niveau afin d'être en mesure de remplir les conditions nécessaires pour accueillir un modèle de maintenance 4.0. Nous aviserons aussi la maturité numérique de l'hôpital en utilisant les modèles sélectionnés au chapitre. Une fois l'évaluation de la maturité numérique terminée, nous appliquerons la méthode choisie au chapitre 2 pour sélectionner l'algorithme adéquat qui pourrait être utilisé dans un modèle de maintenance 4.0. Nous proposerons ensuite une feuille de route qui servirait à visualiser le déroulement des grandes étapes de la transition vers un modèle de maintenance 4.0.

4.1 Vigie technologique pour l'étude de la transformation numérique : Cas de l'Hôpital Honoré-Mercier

La Covid-19 a été l'un des facteurs majeurs de la transition de notre projet qui était d'établir une procédure de mise en place et de réalisation d'une maintenance 4.0. Après mon admission à un stage en génie biomédical à l'hôpital Honoré-Mercier de Saint-Hyacinthe, nous avons décidé donc d'utiliser cette opportunité pour étudier le fonctionnement de la maintenance biomédicale dans cet hôpital afin de pouvoir détecter leurs manquements et d'apporter notre expertise pour proposer des solutions et des plans d'action qui leur permettrait de migrer vers une maintenance 4,0 adaptée bien sûr en fonction des services qu'ils offrent. Nous commencerons par effectuer une évaluation de la maturité numérique en présentant le principe

de fonctionnement de la maintenance biomédicale dans cet hôpital et ensuite nous proposerons une procédure et des outils qui pourront être mis en place pour optimiser cette maintenance et la faire migrer vers le 4.0.

4.1.1 Principe de fonctionnement de la maintenance biomédicale

Le biomédical est une discipline dans laquelle on regroupe plusieurs connaissances et concepts multidisciplinaires pour les utiliser dans le domaine de l'ingénierie dans le but de contrôler les systèmes biologiques ou développer des appareils servant au diagnostic et au traitement des patients. La maintenance biomédicale à l'hôpital Honoré-Mercier de Saint-Hyacinthe et en général en milieu hospitalier est gérée en interne et en externe.

i. La maintenance biomédicale externe

C'est une maintenance qui est planifiée et gérée par le personnel biomédical technique de l'hôpital en collaboration avec les entreprises externes et les utilisateurs des équipements, mais qui est exécutée uniquement par les entreprises externes. Les utilisateurs des équipements médicaux lorsqu'il y a un dysfonctionnement sur équipement peuvent créer une requête dans le logiciel de gestion de maintenance (GMAO) des équipements biomédicaux en faisant une description de la panne (Annexe II : Modules Octopus). Le rôle du technicien biomédical une fois qu'il reçoit la requête est d'aller vérifier l'équipement en simulant de nouveau la panne pour être en mesure de mieux la décrire pendant l'appel de service à la compagnie externe qui a la charge de l'équipement. Une fois la panne décrite, la compagnie aura deux choix pour effectuer sa maintenance corrective :

- Si la panne est minime, elle peut s'appuyer sur le technicien biomédical expérimenté en lui donnant des instructions précises pour résoudre le problème à distance,
- Si la panne est majeure ou si l'équipement est hors service, la compagnie externe en collaboration avec le technicien va planifier une intervention en consultant au préalable l'utilisateur pour s'assurer de la disponibilité de l'équipement.

La maintenance préventive, quant à elle, est planifiée automatiquement par l'équipe des ingénieurs et lorsqu'elle apparaît sur le tableau des requêtes du technicien responsable du

département dans lequel se trouve l'équipement ; il doit contacter la compagnie pour organiser l'intervention et ceci toujours en consultant l'utilisateur. Une fois les travaux effectués, qu'il s'agisse d'une maintenance préventive ou corrective, la compagnie externe doit rédiger un rapport de service et le remettre au technicien qui aussi devrait rédiger son propre rapport dans le logiciel de GMAO pour garder un historique des dysfonctionnements sur chaque équipement et assurer le suivi.

ii. La maintenance biomédicale interne

C'est une maintenance qui est planifiée, gérée, programmée par le personnel de l'hôpital en collaboration avec les utilisateurs des équipements, mais qui est exécutée par le service technique du département biomédical. Une fois la requête de demande de travail arrivée sur le tableau du technicien biomédical, il va inspecter l'équipement et à l'issue de son inspection il aura 2 choix :

- Si l'équipement est réparable, il va résoudre le problème directement et rédiger son rapport dans le logiciel de gestions de la maintenance pour garder un historique de la maintenance corrective effectuée.
- Si l'équipement est non réparable, il va devoir le déclarer déclaré hors service et remplir par la suite un document de vétusté (Annexe III : Formulaire de vétusté) qui sera envoyé au chef de service et aux ingénieurs pour planifier le remplacement selon les besoins de l'utilisateur. Dans ce cas de figure, si nous possédons le même type d'équipement en stock, nous allons le leur prêter le temps de réparer ou de remplacer leur équipement défectueux.

Dans le cadre de la maintenance préventive, lorsqu'un équipement arrive en fin de vie, son remplacement doit être planifié bien en avance pour éviter un arrêt des services en attendant l'arrivée du nouvel équipement. Lorsque le nouvel équipement arrive, le technicien biomédical a la responsabilité de vérifier la conformité de l'équipement en adéquation avec certaines normes, de monter l'équipement, d'effectuer les tests nécessaires et de s'assurer de la mise en service. Si le technicien reçoit une demande de maintenance préventive classique sur son tableau de bord, il va devoir effectuer la maintenance préventive en suivant les recommandations du manufacturier. Lors d'une maintenance préventive ou corrective

effectuée par le service et technique de l'hôpital, si nous n'avons pas d'équipement de prêt à leur donner le temps finaliser une intervention nécessitant un arrêt de services, nous pouvons procéder à une réaffectation du même type d'équipement générique dans les départements qui sont en manque le temps de finaliser l'intervention.

L'organigramme ci-dessous de la Figure 3.2 nous donne un aperçu du fonctionnement de la maintenance biomédicale à de l'hôpital honoré-mercier. Les principaux acteurs de cette maintenance sont :

- le personnel médical,
- le personnel biomédical,
- les prestataires.

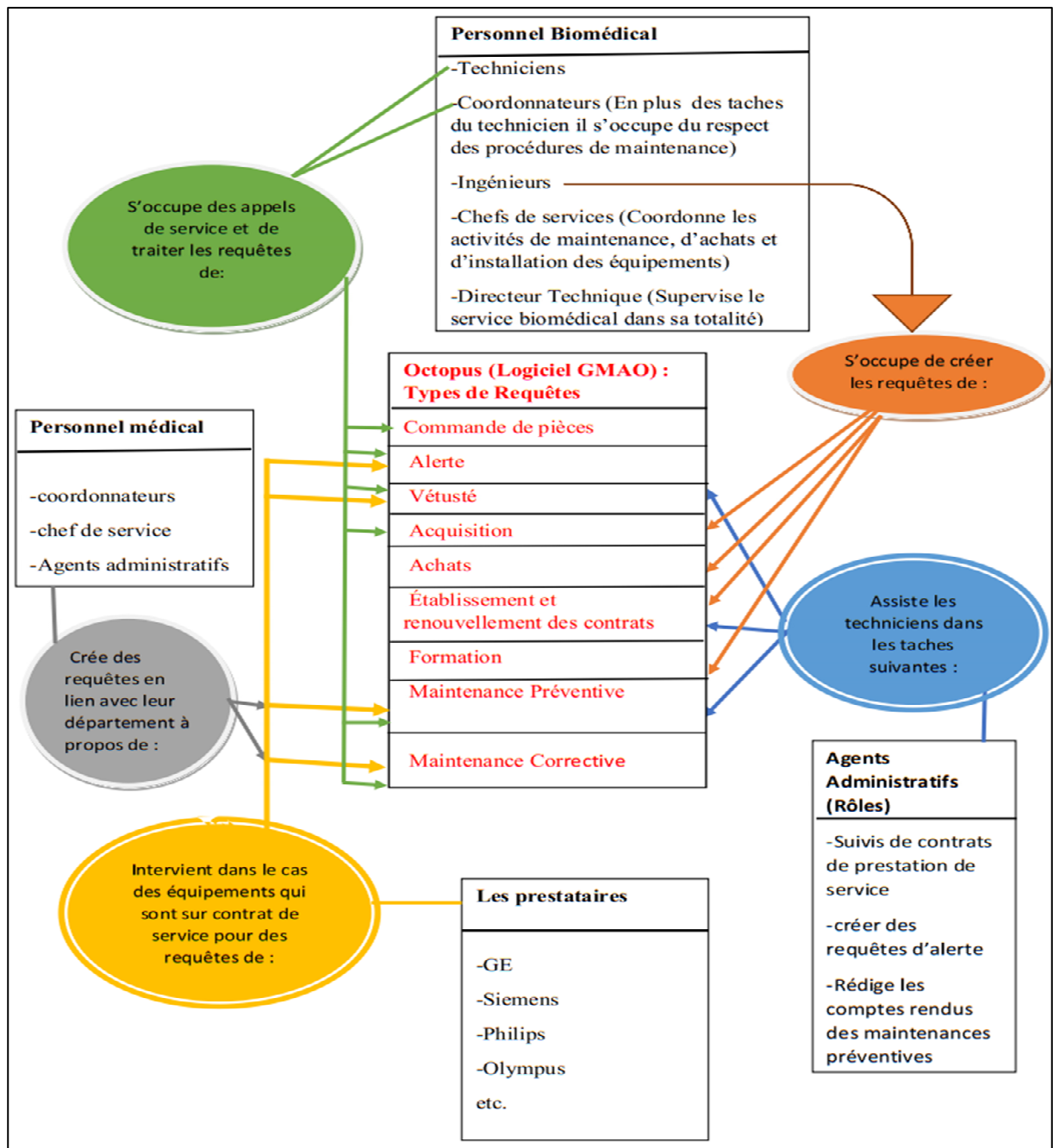


Figure 4.1 Organigramme du fonctionnement de la maintenance biomédicale à l'hôpital Honoré Mercier.

Le personnel médical qui intervient dans le fonctionnement de la maintenance biomédicale comme on peut le voir, la figure 4.1 est constituée des coordonnateurs, des chefs de service et des agents administratifs. Son rôle dans la maintenance biomédicale est de créer des requêtes

dans le GMAO de l'hôpital qui est Octopus pour afin de pouvoir rapporter avec le plus de détails les problèmes qui surviennent dans leur département au personnel du GBM. Les types de requêtes créées par ces profils concernent essentiellement la maintenance préventive et corrective. La maintenance préventive est le plus souvent demandée par le chef de service ou le coordonnateur qui sont chargés de rendre disponible l'équipement au moment de l'intervention qui sera ensuite créée et suivie par le personnel biomédical.

Le personnel biomédical quant à lui est chargé de résoudre toutes les requêtes provenant du personnel médical, ces requêtes sont traitées différemment selon leur type d'équipement, le type de requêtes, s'il est sous contrat ou non. Ses principaux acteurs sont les suivants :

i. Les techniciens biomédicaux

Ils sont chargés d'effectuer la maintenance corrective et préventive de tous les équipements médicaux qui ne sont pas sous contrat de service. Les tâches qu'ils effectuent sont essentiellement :

A. La gestion des alertes

Ce sont des recommandations qui viennent du fournisseur ou du manufacturier concernant des mises à jour, des entretiens, des réparations ou des mises en garde qui doivent être faits dans des délais précis, afin d'éviter que l'équipement ne fournisse de fausses mesures ou de mettre en danger la sécurité des utilisateurs et la santé des patients.

B. L'entretien préventif

Les entretiens préventifs qui sont générés par les agentes administratives et ceux qui doivent être réalisés par les techniciens biomédicaux sont uniquement sur les équipements qui ne sont pas sous contrat de service ou sous garantie.

C. La réparation des équipements

Le technicien est autorisé à effectuer une maintenance corrective sur un équipement médical si et seulement s'il a reçu une formation sur cet équipement pour pouvoir le faire, de peur

d'effectuer un faux diagnostic ou une fausse évaluation. Lorsqu'un équipement tombe en panne, le technicien est supposé le réparer le plus rapidement possible afin d'éviter une rupture de service, mais pour des équipements qui sont sous contrats de service, son rôle serait plutôt d'effectuer les appels de services et de planifier des interventions de maintenance des prestataires. Il arrive que le technicien en collaboration avec le prestataire effectue des analyses préliminaires avant l'intervention du prestataire pour réduire le temps de réparation d'un équipement.

D. La déclaration des vétustés

Un équipement peut être déclaré vétusté soit par le fournisseur lorsqu'il arrive en fin de vie, soit par le personnel biomédical pour des raisons de rupture de pièces de rechange, parce qu'il est arrivé en fin de vie et qu'on le remplace, pour des raisons de coût de réparation ou parce qu'il est irréparable.

E. La vérification, l'inventaire et l'acquisition des nouveaux équipements

L'un des rôles du technicien lorsqu'on reçoit un nouvel équipement c'est de vérifier qu'il est conforme aux normes de santé et de sécurité électrique au Canada ; d'effectuer l'inventaire dans le parc des équipements biomédicaux et d'effectuer les tests de fonctionnalités et de sécurité électrique recommandée par le manufacturier avant de le mettre en service.

ii. Les ingénieurs biomédicaux

Les tâches qu'ils effectuent sont essentiellement :

A. Achat et acquisition

L'achat ou le renouvellement de certains équipements se fait soit par appel d'offres, soit par gré à gré. Une fois l'équipement choisi et approuvé, l'ingénieur doit se rassurer qu'il est livré à la bonne adresse ou que ça arrive à bon port. Les achats de nouveaux équipements se font selon les besoins et les recommandations des utilisateurs, donc les ingénieurs sont contraints avant d'effectuer un renouvellement ou un nouvel achat de composer entre les besoins des utilisateurs et leurs connaissances du matériel biomédical.

B. Établissement et renouvellement des contrats

Lors de l'achat ou du renouvellement d'un équipement médical, un des éléments importants à prendre en considération est l'établissement ou le renouvellement d'un contrat de prestation de service. Les termes du contrat sont essentiellement négociés par l'ingénieur ou la personne chargée de l'achat. L'aspect formation est un des éléments qui peut parfois être intégré lors du renouvellement d'un contrat.

Le respect des normes de construction et d'installation lors de la réalisation des projets est assuré en particulier par un ingénieur avec le profil de physicien. Il réalise les plans de construction et s'assure que les concepts de radio et protection pour les projets en imagerie sont respectés. Il propose des projets d'agrandissements ou de modification en imagerie afin d'améliorer leur service et il agit en tant que conseiller en matière de radioprotection et de sécurité lors de l'utilisation des appareils d'imagerie.

iii. Les chefs de service

L'hôpital possède deux chefs de service dans le département biomédical, un pour l'équipe des ingénieurs et un autre pour l'équipe des techniciens. Les rôles des chefs de service consistent à organiser la maintenance, le remplacement et le renouvellement des équipements. Ils sont chargés d'amorcer les projets, d'attribuer les tâches aux différents employés et d'effectuer le suivi jusqu'à l'implémentation et la livraison du projet.

iv. Le directeur technique

Il dirige le service biomédical au complet, il assure la communication et l'échange d'informations entre le génie biomédical, les autres services et la haute direction. Il veille au respect des normes lors de l'implémentation des projets.

v. Les prestataires

Le rôle des prestataires est d'effectuer des maintenances préventives et correctives sur les équipements qui sont sous contrat de service ou lorsque les techniciens n'ont aucune connaissance ou n'ont reçu aucune formation sur ces équipements. Il est possible que les

prestataires collaborent avec les techniciens de l'hôpital lorsque ceux-ci ont reçu une formation partielle sur les équipements concernés afin d'effectuer un diagnostic préliminaire et de résoudre la panne si elle est mineure.

vi. Les agentes administratives

Ils ont pour rôle d'aider les techniciens dans leurs tâches en effectuant certaines tâches administratives qui prendraient une partie de leur temps. Ils sont chargés aussi d'effectuer les suivis administratifs de certains dossiers d'équipements. Dans les différents départements, ils aident le service biomédical à recenser et décrire les pannes qui arrivent sur les équipements médicaux.

4.1.2 Vigie technologique du secteur biomédical de l'hôpital Honoré-Mercier

Dans une vigie ou une veille technologique, nous sommes censés relever les manquements technologiques des équipements en comparaison avec les avancées technologiques existantes ; mais étant donné que notre mémoire est focalisée sur les techniques de maintenance 4.0, nous allons plutôt comparer les opérations de maintenance qui se font dans cet établissement à ce qui se fait actuellement ou aux pratiques les plus efficaces. Le matériel médical à l'hôpital est réparti en fonction de leurs utilisations (diagnostic, chirurgie et soins médicaux) et leurs applications dans les différents départements (imagerie, urgences, inhalothérapie, endoscopie, etc.). Le parc matériel d'un hôpital peut varier aussi en fonction de sa taille qui peut être estimée au nombre de lits qu'il possède. Ces équipements peuvent regrouper en deux catégories :

i. Équipements biomédicaux sous prestation de services à l'hôpital Honoré Mercier

Les équipements biomédicaux sont utilisés en grande partie pour le diagnostic et le traitement. Quelle que soit leur taille, on accorde le plus souvent une attention particulière à ceux qui sont très dispendieux. Les prestations de services sur certains équipements comparés à d'autres témoignent parfois de l'attention particulière qu'on leur accorde. La vigie technologique des équipements biomédicaux de l'hôpital Honoré-Mercier pourrait aussi varier en fonction de la taille et de la complexité des équipements.

Les gros équipements en génie biomédical sont pour la plupart les plus complexes et demandent des compétences particulières pour être en mesure de les maintenir. Ayant été technicien responsable de l'imagerie, l'une des remarques que je pourrais effectuer en ce qui concerne les gros équipements, c'est que ceux de l'hôpital Honoré-Mercier sont fonctionnels, mais ne sont pas les plus récents ou les plus à la pointe de la technologie. L'IRM, le scanner, la caméra GAMMA, la radiographie, etc., sont quelques-uns de ces gros équipements qui sont utilisés pour le diagnostic et le traitement. Les avancées technologiques en ce que concerne en général le matériel biomédical sont très rapides et innovantes, mais à cause de leur prix qui sont souvent très élevés, les hôpitaux sont souvent contraints de les garder le plus longtemps possible tant qu'ils sont fonctionnels. Cet aspect est l'un des tout premiers que nous allons relever ici concernant la vigie technologique. Quelles que soient les avancées et les innovations que possèdent les nouveaux appareils sur le marché, les hôpitaux ne les remplacent très souvent pas tant qu'ils sont fonctionnels ou pour les hôpitaux publics, tant qu'un nouveau budget de renouvellement n'a pas été attribué ou encore tant qu'il n'y a pas eu d'incident majeur qui rendrait l'appareil non fonctionnel. Compte tenu du fait que ces gros équipements ont une longue durée de vie, nous allons nous focaliser plutôt sur les pratiques de maintenance adoptées par l'hôpital honoré Mercier sur ces types d'équipements. Les tableaux 4.1 à 4.3 ci-dessous sont des résumés de ces pratiques, les conséquences qu'elles entraînent avec en comparaison les pratiques de maintenance plus récentes et plus efficaces qui se font. Nous avons séparé notre veille technologique selon 3 différentes approches, à savoir :

A. Une approche liée aux prestations des employés du service biomédical

Tableau 4.1 Veille technologique des prestations sur les équipements biomédicaux sous contrat de service, cas de l'hôpital Honoré-Mercier.

Observation faite au niveau des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Conséquences des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Pratiques de maintenance biomédicales actuelles dans d'autres hôpitaux ou proposition de solutions.
Les techniciens biomédicaux ne reçoivent aucune formation de maintenance sur ces équipements	Lorsqu'il n'y a aucun contrat partagé avec les hôpitaux, aucune information n'est donnée aux techniciens qui seront responsables de leur maintenance.	Certains hôpitaux offrent des formations partagées afin que le technicien puisse résoudre des pannes moins complexes et urgentes.
Le technicien biomédical est parfois appelé en urgence pour trouver des solutions lorsque l'un des appareils est non fonctionnel bien qu'il n'ait reçu aucune formation.	Prolongation des délais de résolution de pannes sur les équipements sous contrat de service.	Les techniciens reçoivent une formation partagée.

Observation faite au niveau des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Conséquences des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Pratiques de maintenance biomédicales actuelles dans d'autres hôpitaux ou proposition de solutions.
<p>Le technicien biomédical n'a pas d'équipement de protection adéquat, malgré sa proximité avec des équipements qui peuvent être dangereux pour sa santé à long terme comme les équipements de radiologie.</p>	<p>Le technicien pourrait être exposé aux rayons X ou à d'autres radiations.</p>	<p>Certains hôpitaux possèdent des équipements de protection adéquats pour les techniciens biomédicaux.</p>
<p>Il n'y a aucune participation et même à titre de formation des techniciens biomédicaux lors de l'installation des nouveaux équipements, malgré le fait qu'ils devront être responsables de la gestion de la maintenance de ces équipements après leur installation même sans avoir reçu de formation.</p>	<p>Le technicien ne détient aucune information sur l'équipement, ce qui pourrait exercer une influence sur la qualité du service rendu et le temps de résolution des pannes.</p>	<p>Certains hôpitaux offrent des contrats partagés de maintenance qui permettent aux techniciens de bénéficier d'une formation, lors de l'installation de ces types d'équipements.</p>

B. Une approche liée aux procédures de maintenance

Tableau 4.2 Veille technologique des procédures de maintenance des équipements biomédicaux sous contrat de service, cas de l'hôpital Honoré-Mercier

Observation faite au niveau des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Conséquences des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Pratiques de maintenance biomédicales actuelles dans d'autres hôpitaux ou proposition de solutions.
<p>Les appels de service se font pour la plupart sur la base de la création d'une requête, sans aucune vérification de la part d'une personne qui est formée pour ça et qui en a les compétences.</p>	<p>Perte de temps au niveau des services fournis.</p>	<p>Pour certains hôpitaux qui ont des contrats partagés, le technicien de l'hôpital est obligé d'effectuer un diagnostic avant de passer un appel de service si la panne est au-delà de ses compétences.</p>
<p>Pour des équipements qui sont importants, les vérifications se font uniquement lors des maintenances préventives et correctives.</p>	<p>Impossibilité d'anticiper sur les futurs pannes et perte de temps.</p>	<p>Aucun hôpital n'organise des tournées d'inspection à chaque mois afin de déterminer en avance des problèmes qui pourraient arriver.</p>

Observation faite au niveau des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Conséquences des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Pratiques de maintenance biomédicales actuelles dans d'autres hôpitaux ou proposition de solutions.
Les gestionnaires des départements qui ne passent pas toujours par le service biomédical pour effectuer les appels de services	Perte de temps et non-partage des données lorsque le technicien de la compagnie externe sollicite l'aide du service biomédical de l'hôpital.	Les opérations de maintenance se font en contrats partager avec les techniciens des hôpitaux
Le service biomédical n'est pas toujours avisé après une intervention de maintenance.	Non-sauvegarde de l'historique des pannes.	Dans certains hôpitaux, il n'y a que le GBM qui est autorisé à appeler les compagnies contractuelles.
Les interventions sont très dispendieuses lorsqu'un de ces équipements est non fonctionnel et qu'il faudrait le réparer quand même, bien que le contrat soit expiré.	Délais et couts supplémentaires au niveau des réparations.	Beaucoup d'hôpitaux font face au problème du renouvellement en retard des contrats de service.
Les délais de réparation peuvent être trop longs, même si l'intervention est mineure, du fait que le prestataire doit se déplacer à chaque fois.	Perte de temps et couts supplémentaires parfois.	Avec un contrat de maintenance partagé et une formation en maintenance, certains prestataires peuvent guider le technicien à distance pour effectuer des réparations mineures.

C. Une approche a l'utilisation des ressources logicielles

Tableau 4.3 Veille technologique et logicielle des équipements biomédicaux sous contrat de service, cas de l'hôpital Honoré-Mercier

Observation faite au niveau des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Conséquences des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Pratiques de maintenance biomédicales actuelles dans d'autres hôpitaux ou proposition de solutions.
Le service biomédical ne possède pas d'accès à ces équipements (mot de passe et login) et les outils nécessaires pour intervenir.	Perte de temps et difficultés à collaborer avec les prestataires pour la résolution de certaines pannes.	Certains hôpitaux ont un meilleur suivi afin de collecter le maximum d'informations qui servira plus tard lors de la maintenance.
Il n'existe aucune surveillance à temps réel de ces équipements qui sont très importants pour les centres hospitaliers et parfois uniques.	Non-existence du système de maintenance prédictif.	Aucun hôpital n'a encore mis en place un moyen de surveillance à temps réel sur des appareils ou il est possible de le faire.

Les tableaux 4.1 à 4.3 ci-dessus nous permettent de relever les manquements des pratiques de maintenance à l'hôpital Honoré-Mercier, les conséquences qu'elles entraînent et nous donnent une idée sur ce qui se fait en matière de maintenance biomédicale dans les autres centres hospitaliers ou des solutions qu'on pourrait mettre en place. Comme on peut le remarquer, la

maintenance à l'hôpital honoré Mercier a beaucoup de lacunes qui l'empêchent de se rapprocher vers un modèle de maintenance 4.0 qui est l'idée centrale de notre mémoire. La gestion de la maintenance des gros équipements dans un hôpital est assez complexe, parce que l'arrêt d'un de ces équipements pourrait causer un gros retard au niveau des services fournis dans un hôpital. Celle de l'hôpital Honoré-Mercier que nous avons eu l'occasion d'étudier a beaucoup de manquement que nous pouvons observer grâce aux tableaux 4.1 à 4.3 ci-dessus. Nous proposerons des solutions plus tard dans la suite de notre mémoire. Le modèle de fonctionnement d'un équipement dans cet hôpital pourrait varier d'une machine à une autre et en fonction de sa taille comme nous constaterons en comparant les manquements listés dans cette section et ceux de la section suivante.

ii. Gestion de la maintenance des équipements biomédicaux sans prestation de services à l'hôpital Honoré Mercier

Ayant été technicien biomédical pendant 1 an à l'hôpital Honoré-Mercier, les petits équipements, les équipements avec une date de renouvellement proche et ceux à faibles couts font partie du matériel biomédical sur lequel nous avons le droit de travailler. Mon expérience comme technicien pendant toute une année et demie dans cet hôpital m'a permis de constater malheureusement que les formations techniques et les certifications sur le matériel biomédical ne faisaient pas partie de la priorité du service. Après avoir observé le même traitement avec les nouveaux techniciens-arrivants et des anciens, j'ai pu constater que nous étions obligés de nous former en autodidacte sur chaque équipement à réparer nous-mêmes qu'on recevait. Les catégories des équipements listés ci-dessus font partie de ceux que nous avons pu observer sans contrat de service. Quelques-uns de ces équipements sont, les anciens ECG, les pompes à perfusions, les appareils de mesure des signes vitaux, des concentrateurs d'oxygènes, des pousses de seringues, des défibrillateurs, etc. À cause de l'insuffisance de données, de la complexité et du nombre élevé des équipements biomédicaux, de l'inaccessibilité à la technologie et aux informations qui ont servi à fabriquer ces équipements, nous ne pouvons pas effectuer une vigie technologique matérielle de ces équipements en vue d'améliorer leur maintenance ; mais nous allons plutôt nous focaliser sur les outils et méthodes de maintenance appliquées aux équipements qui ne sont pas sous prestation de service. Les tableaux 4.1 à 4.3 ci-dessous nous donnent un aperçu sur le fonctionnement de la maintenance à l'hôpital honoré

Mercier versus ce qu'on pourrait observer dans d'autres hôpitaux. Nous avons séparé notre veille technologique selon 3 différentes approches, à savoir :

A. Une approche liée aux prestations des employés du service biomédical

Tableau 4.4 Veille technologique des prestations sur les équipements biomédicaux sans contrat de service, cas de l'hôpital Honoré-Mercier

Observation faite au niveau des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Conséquences des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Pratiques de maintenance biomédicales actuelles dans d'autres hôpitaux ou proposition de solutions.
Les techniciens travaillent en autodidacte pour effectuer les maintenances préventives et correctives des équipements	<ul style="list-style-type: none"> • La résolution des pannes prend plus de temps. • Perte en argent. • Augmentation possible des erreurs de procédures. 	Les hôpitaux envoient régulièrement en formations les techniciens pour faire une remise à niveau de leurs connaissances.
Aucune fréquence au niveau du suivi des maintenances préventives.	Toutes les maintenances préventives ne se font pas à temps, ce qui pourrait causer plus de pannes et des arrêts de services.	Avec un processus d'alerte de maintenance préventive automatique, il serait possible d'aviser les gestionnaires des prochaines dates de maintenance préventive proches.
Difficultés à rendre disponibles les équipements pour effectuer la maintenance préventive.	Toutes les maintenances préventives ne se font pas à temps, ce qui pourrait causer plus de pannes et des arrêts de services.	Avec un processus d'alerte de maintenance préventive automatique, il serait possible pour les gestionnaires des départements de mieux s'organiser pour rendre disponible un équipement pour la maintenance préventive.

B. Une approche liée aux procédures de maintenance

Tableau 4.5 Veille technologique des procédures de maintenance des équipements biomédicaux sans contrat de service, cas de l'hôpital Honoré-Mercier

Les observations faites au niveau des pratiques de maintenance biomédicales actuelles ont Honoré Mercier	Conséquences des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Pratiques de maintenance biomédicales actuelles dans d'autres hôpitaux ou proposition de solutions.
<p>Il n'y a pas de suivi fait sur une fréquence régulière par les techniciens sur les équipements biomédicaux et les interventions se font uniquement lorsqu'une panne est signalée.</p>	<p>Non-anticipation de pannes.</p> <p>Délais supplémentaires pour la résolution des pannes.</p> <p>Perte d'argent.</p> <p>Arrêts de services</p>	<p>Il pourrait être possible d'effectuer des tournées d'inspection chaque semaine pour se rassurer du bon fonctionnement des équipements et anticiper sur les réparations.</p>
<p>On vérifie la disponibilité des pièces de rechange seulement au moment des réparations.</p>	<p>Les délais de réparations sont souvent plus longs à cause de la rupture ou du manque de suivi au niveau du renouvellement des pièces de rechange</p>	<p>Il serait possible d'effectuer des vérifications du stock des pièces de rechange chaque fin du mois ou d'automatiser la gestion des pièces de remplacement</p>

Les observations faites au niveau des pratiques de maintenance biomédicales actuelles ont Honoré Mercier	Conséquences des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Pratiques de maintenance biomédicales actuelles dans d'autres hôpitaux ou proposition de solutions.
Aucun suivi n'est fait au niveau des formations et des certifications des techniciens.	<ul style="list-style-type: none"> • Les techniciens accusent du retard en ce qui concerne les pratiques en maintenance biomédicales et leurs connaissances sur certains équipements médicaux. • Entraîne des retards au niveau des réparations de nouvelles générations d'équipements. 	Il serait possible de mettre en place un processus d'alerte automatique pour aviser le chef de service lorsque les périodes de recertifications approchent afin qu'il puisse mieux les planifier.
Aucun procédé n'est mis en place pour valider si les maintenances préventives et correctives sont faites selon les recommandations (sauf pour les spots et les pompes à perfusion).	Le technicien pourrait effectuer des erreurs lors de la réparation des équipements sans qu'il ne s'aperçoive ou sans qu'aucune vérification ne soit faite.	Il serait possible de mettre en place des algorithmes qui permettraient de valoriser les données de maintenance pour automatiser le système d'alerte de panne et de prise de décision lors d'une réparation.

C. Une approche a l'utilisation des ressources logicielles

Tableau 4.6 Veille technologique logicielle des équipements biomédicaux sans contrat de service, cas de l'hôpital honoré Mercier

Observation faite au niveau des Pratiques de maintenance biomédicales actuelles à Honoré Mercier	Conséquences des pratiques des maintenances biomédicales actuelles à Honoré-Mercier,	Pratiques de maintenance biomédicale actuelle dans d'autres hôpitaux ou proposition de solutions.
<p>Pour des pannes qui sont parfois récurrentes, aucune valorisation ou exploitation de données n'est faite.</p>	<p>Perte d'argent Perte de temps Impossibilité de diminuer la fréquence de répétition de ces pannes.</p>	<p>Il serait possible de mettre en place des algorithmes qui permettront de valoriser les données de maintenance pour automatiser le système d'alerte de panne et de prise de décision lors d'une réparation.</p>
<p>Les techniciens rédigent un rapport d'interventions sur les équipements biomédicaux qu'ils réparent, mais aucune méthode n'est mise en place pour exploiter ces données afin d'améliorer la maintenance.</p>	<p>– Laxisme au niveau de la rédaction des rapports étant donné que les données ne seront pas exploitées plus tard. – Perte d'argent – Perte de temps – Impossibilité de diminuer la fréquence de répétition de ces pannes</p>	<p>Il serait possible d'effectuer un meilleur suivi automatique grâce aux algorithmes afin d'être alerté automatiquement lorsque la maintenance préventive d'un équipement est due.</p>

En faisant un résumé, des tableaux 4.4 à 4,6 ci-dessus mettent en évidence les faiblesses de la maintenance biomédicale à l'hôpital Honoré Mercier et les éléments qui pourraient nous montrer qu'ils n'ont pas un modèle de maintenance 4.0 ou qu'ils ne sont pas encore en voie d'en avoir. Les logiciels présentement utilisés en maintenance par le génie biomédical sont Octopus pour la gestion des requêtes de maintenance, des pièces de rechange et GRM pour la gestion des bons de commande.

Les logiciels cités précédemment sont présentement utilisés à l'hôpital Honoré Mercier comme outils d'aide à la maintenance et ne serviraient qu'à créer des requêtes et stocker des données. La majorité des logiciels d'aides à la gestion de la maintenance ne sont pas parfois utilisés qu'à une infime partie de leurs potentiels. L'un des rôles de migration vers le 4.0 est aussi de mettre en place ce genre de système ou de développer des processus pour mieux exploiter ce genre de ressource.

4.2 Suggestion d'idées d'améliorations des opérations de maintenance à Honoré-Mercier

La liste des éléments énumérés précédemment, concernant les lacunes du système de maintenance biomédical de l'hôpital Honoré Mercier nous a permis de recenser des points sur lesquels nous nous sommes concentrés pour réfléchir à des solutions qu'on pourrait apporter afin que leur modèle de maintenance puisse migrer vers le 4.0.

4.2.1 Amélioration des opérations de maintenance des équipements biomédicaux sous contrat de service.

Le processus de gestion de la maintenance des équipements biomédicaux sous contrat de service diffère de celui des autres équipements qui sont directement gérés par le personnel biomédical de l'hôpital. Nous avons décidé, en faisant référence à chaque fois, d'apporter des solutions individuelles à chacun des problèmes listés dans les tableaux 4.1 à 4.3 :

A. Toutes les opérations de maintenance sont faites par des prestataires, même les plus petites et les techniciens biomédicaux ne reçoivent aucune formation de maintenance sur ces équipements.

Nous avons observé que le fait d'attribuer aux entreprises l'exclusivité sur les réparations faites sur les équipements biomédicaux sous contrat de service à l'hôpital Honoré Mercier empêche le développement des compétences des techniciens, le retard au niveau des interventions, les dépenses supplémentaires en temps et argent, les ruptures de services fréquentes.

Le développement des compétences des techniciens passe par les formations et le fait de confier toute la gestion de la maintenance des équipements qui sont sous contrat de service aux entreprises externe contribue à ce qu'ils manquent de connaissances pour agir en cas d'urgence ou d'indisponibilité des techniciens des entreprises sous-traitantes. Les clauses de certains contrats de service empêchent les techniciens des entreprises externes de collaborer à distance avec les techniciens GBM de l'hôpital pour ressourdre des pannes minimes de peur d'être poursuivis pour non-respect de clauses du contrat ; ce qui entraîne très souvent des ruptures de services, des pertes de temps et d'argent parce que l'hôpital est obligé d'attendre la venue du technicien qui parfois se trouve dans une autre ville.

Une solution qu'on pourrait proposer concernant ce problème serait de négocier avec les entreprises manufacturières, des contrats des services partagés avec un volet formation des techniciens GBM de l'hôpital, dans lequel les tâches et les pannes sur lesquelles ils pourront intervenir seront définies au préalable.

B. Les gestionnaires des départements qui ne passent toujours pas par le service biomédical pour effectuer les appels de services et le service biomédical ne sont pas toujours avisés après une intervention de maintenance.

Lorsqu'une panne arrive sur équipement qui est sous contrat de service, le premier réflexe du technicien externe est d'appeler la personne-ressource du service GBM responsable de ce département, qui n'est parfois pas au courant de l'existence de la panne et ne peut donc pas aider à faire un premier diagnostic. Une autre des conséquences de ne pas aviser le département GBM lorsqu'il y a un bris de service est le manque de suivis de la part des techniciens

responsable des départements et l'impossibilité de collecter de données qui pourront servir plus tard à améliorer la maintenance et la faire tendre vers le modèle 4.0.

Une solution à ce problème pourrait être de permettre uniquement aux techniciens GBM de passer des appels de services, afin de leur permettre d'effectuer un meilleur suivi, de centraliser les données et les informations qui pourront être exploitées plus tard lors de la construction d'un modèle de données pour la maintenance 4.0.

C. Les interventions sont très dispendieuses lorsqu'un de ces équipements est non fonctionnel et qu'il faudrait le réparer quand même, bien que le contrat soit expiré.

Le logiciel Octopus utilisé par l'hôpital pour la gestion des équipements et des requêtes de maintenance n'est pas automatisé, ce qui pourrait parfois créer un oubli au niveau du renouvellement des contrats de service et retarder une intervention.

Une solution à ce problème pourrait être d'automatiser leur gestion de la maintenance biomédicale pour la faire tendre vers le modèle 4.0 afin d'être avisée automatiquement lorsque la date d'expiration d'un contrat de service approcherait pour qu'ils puissent enclencher le processus plutôt.

D. Le service biomédical est parfois appelé en urgence pour trouver des solutions lorsque l'un de ces appareils est non fonctionnel bien qu'ils n'aient reçu aucune formation.

La répartition du travail dans le département entre les techniciens GBM les rend responsables des équipements de ces départements, même s'ils n'ont reçu aucune formation. Ceci nous ramène donc à l'un des points dont nous avons parlé ci-dessus, qui est de permettre aux techniciens d'avoir des formations partielles sur les équipements sous contrat de service afin qu'ils puissent intervenir pour résoudre des pannes urgentes qui ne nécessitent pas forcément des connaissances poussées sur ces appareils médicaux.

E. Le service biomédical ne possède pas d'accès à ces équipements (mot de passe et login) et les outils nécessaires pour intervenir.

Une solution que nous pouvons proposer à cette problématique serait de demander les accès aux entreprises manufacturières afin que les techniciens puissent accéder à un certain menu

restreint des équipements pour agir en cas d'urgence sur certains équipements lorsqu'il s'agit d'un problème mineur. Les accès et les mots de passe déjà obtenus doivent être stockés dans la base de données ou le logiciel GMAO de l'hôpital de façon structurée afin que tous les techniciens puissent y avoir accès facilement et rapidement.

F. Les délais de réparation peuvent être trop longs, même si l'intervention est mineure, du fait que le prestataire doit se déplacer à chaque fois.

Il arrive parfois qu'après le passage du technicien d'une compagnie de prestataire de service, que la même panne ou une autre panne resurgisse, ce qui contraint le technicien à devoir une revenir pour résoudre le problème même si la panne est mineure. Certaines des conséquences de cette situation sont ; les ruptures de services et les dépenses supplémentaires qui sont créées par le fait que le technicien de la compagnie de prestation va facturer le temps supplémentaire effectué à cause de la panne.

Une solution à ce problème, comme nous l'avons déjà mentionné ci-dessus, est de former aussi les techniciens GBM de l'hôpital afin qu'ils puissent intervenir pour régler des pannes mineures.

G. Il n'existe aucune surveillance en temps réel de ces équipements qui sont très importants pour les centres hospitaliers et parfois uniques.

L'objectif de faire une surveillance à temps réel sur des équipements, c'est de pouvoir anticiper sur les pannes qui pourraient arriver de façon inattendue, pendant les périodes de garde par exemple, créant ainsi des ruptures de service et engendrant des couts supplémentaires pour l'hôpital.

Une solution serait de mettre en place en collaboration avec le manufacturier, des algorithmes de traitement des données permettant de surveiller à temps réel des équipements et d'aviser les techniciens des éventuelles pannes d'avenir.

Une autre solution pour l'hôpital serait de former les techniciens GBM de l'hôpital sur ces équipements afin qu'ils puissent avoir les connaissances nécessaires pour effectuer les contrôles routiniers, fréquents, documentés sur ces équipements afin d'éviter des pannes et des ruptures de services surprises.

H. Pour des équipements qui sont importants, les vérifications se font uniquement lors des maintenances préventives et correctives.

Comme mentionné dans le point G, les solutions seraient d'effectuer aussi une surveillance en temps réel ou de former les techniciens locaux afin que des contrôles routiniers se fassent sur ces équipements.

I. Les appels de service se font pour la plupart sur la base de la création d'une requête, sans parfois aucune vérification de la part d'une personne qui est formée pour ça et qui en a les compétences.

La solution se trouve encore dans la formation des techniciens GBM pour qu'ils puissent effectuer des vérifications préliminaires avant l'arrivée du technicien de la compagnie de fournisseur de services si nécessaire.

J. Le technicien biomédical n'a pas d'équipement de protection adéquat, malgré sa proximité avec des équipements qui peuvent être dangereux pour sa santé à long terme comme les équipements de radiologie.

La solution serait d'effectuer des contrôles à des intervalles précis pour vérifier que les techniciens ont des équipements adéquats pour leur protection lorsqu'ils travaillent précisément sur certains équipements.

K. Il n'y a aucune participation et même à titre de formation des techniciens biomédicaux lors de l'installation des nouveaux équipements, malgré le fait qu'ils devront être responsables de la gestion de la maintenance de ces équipements après leur installation même sans avoir reçu de formation.

Il faudrait essayer de rendre disponible au moins un technicien GBM de l'hôpital lors de l'installation d'un nouvel équipement afin qu'il puisse se familiariser avec l'équipement et qu'il puisse collecter les informations qui seront nécessaires plus tard pour la maintenance même s'il n'a pas reçu de formation sur cet équipement.

Les solutions proposées ci-dessous face aux problèmes recensés en rapport avec les équipements biomédicaux sous contrat de service peuvent être regroupées en quatre grands axes d'amélioration qui doivent être touchés pour que l'hôpital honoré et Mercier puissent se rapprocher d'une maintenance qui fonctionnerait sous le modèle 4.0. Ces grands axes sont :

- Une amélioration au niveau de la gestion de la maintenance logicielle des équipements sous contrats de service,
- Une amélioration au niveau du processus de maintenance préventive et corrective,
- Une amélioration au niveau du logiciel de gestion de la maintenance afin d'obtenir une meilleure organisation de la sauvegarde et un meilleur suivi,
- Un meilleur outillage et une amélioration au niveau du développement des compétences des techniciens.

4.2.2 Amélioration des opérations de maintenance des équipements biomédicaux sans contrats

Les équipements biomédicaux sans contrats de service sont ceux qui sont entièrement à la charge de l'hôpital, du département GBM et des techniciens. La plupart de ces équipements sont ceux dont la garantie a expiré, ceux qui sont déjà expirés ou dont la date de remplacement est proche ou déjà arrivée, ceux qui ont été achetés sans garanties. Les manquements que nous avons recensés dans les tableaux 4.4 à 4.6 regroupent les remarques que nous avons faites et qui doivent être prises en considération pour passer à la maintenance 4.0. Dans cette section, nous allons proposer des solutions aux problèmes répertoriés. Si elles sont appliquées, cela permettrait d'améliorer considérablement la qualité de la maintenance.

A. Les techniciens travaillent en autodidacte pour effectuer les maintenances préventives et correctives des équipements

La pratique des entreprises d'avoir des employés qui sont autonomes et autodidactes est intéressante, mais pour un hôpital comme Honoré Mercier et en ce qui concerne son plateau technique ; il est important de vérifier que les techniciens GBM aient reçu les formations nécessaires avant de pouvoir intervenir sur les équipements, car il en va de la santé et de la vie des patients.

Une proposition d'une solution serait de former les techniciens au moins sur chaque principe de base des équipements qu'il aura à sa charge et leur permettre de faire une mise à jour ou un recyclage sur chacun des équipements sur lesquels ils ont été formés.

B. Il n'y a pas de suivi fait sur une fréquence régulière par les techniciens sur les équipements biomédicaux et les interventions se font uniquement lorsqu'une panne est signalée.

Une des remarques faites pendant mon expérience comme technicien biomédical était que tous les équipements biomédicaux n'étaient pas répertoriés dans le logiciel de GMAO (Octopus) et les techniciens n'avaient pas un contrôle et une connaissance globale des équipements faisant partie du parc dont ils avaient la responsabilité. Il est parfois arrivé que les responsables des départements achètent du matériel biomédical sans faire vérifier leur conformité et les faire enregistrer par le département GBM.

Une proposition de solution à ces problèmes serait de réorganiser les suivis de tous équipements biomédicaux de l'hôpital en dressant un inventaire du parc d'équipements de tous les départements et en trouvant une façon de repérer un équipement autre que des étiquettes imprimées. Aussi une autre solution serait de renseigner dans le dossier électronique d'un équipement chaque fois qu'il est déplacé et le lieu de sa localisation ; ceci permettrait aux techniciens d'effectuer un meilleur suivi routinier des équipements dont ils ont la responsabilité et de savoir où exactement l'appareil se trouve pour mieux planifier les maintenances préventives.

C. Les délais de réparations sont souvent plus longs à cause du manque de suivi au niveau du renouvellement des pièces de rechange

Une solution qui pourrait ressoudre ce problème serait d'intégrer dans le logiciel GMAO (Octopus) un meilleur suivi de l'utilisation des pièces qui permettrait d'alerter le technicien responsable du département lié à ces pièces de rechange pour qu'il puisse anticiper sur leur renouvellement.

Il pourrait être aussi important d'effectuer un suivi au niveau des statistiques d'utilisation, de rachat et de renouvellement des pièces afin de trouver des moyens de réduire les dépenses et d'éviter le gaspillage.

D. Aucun suivi n'est fait au niveau des formations et des certifications des techniciens.

La formation et la certification des techniciens GBM sur les équipements médicaux sont des éléments majeurs pour le bon fonctionnement de la maintenance biomédicale et il est important que le suivi de leurs formations se fasse de façon automatique à partir du logiciel GMAO. Le chef de service serait avisé automatiquement quand les dates de recertifications ou de formations sont les proches. De cette façon, on pourrait planifier les certifications en avance, afin d'éviter qu'il ait des occasions de rupture des services répétitifs qui pourraient être créés par un nombre insuffisant de techniciens pour couvrir les départements lorsque les autres sont en formation.

E. Pour des pannes qui sont parfois récurrentes, aucune valorisation ou exploitation de données n'est faite.

La valorisation des données est un des éléments importants de la migration vers la maintenance 4.0. La procédure actuelle de maintenance après la réparation d'un équipement est de laisser uniquement une note concernant les problématiques et les travaux effectués, mais après avoir parcouru la majorité des anciennes requêtes dans le logiciel Octopus, elles ne sont pas faites convenablement. Nous avons pu remarquer que les notes ne sont parfois pas entrées en commentaire et même si elles sont faites, elles ne révèlent aucun détail. Cette pratique fait perdre un ensemble d'informations qui pourraient contribuer à mettre en place une technique de maintenance 4.0 qui pourrait servir à faire des prévisions sur les pannes futures des équipements afin de pouvoir les réparer avant qu'ils ne s'arrêtent de fonctionner et qu'ils ne criaient une rupture de service.

Une solution pour valoriser les données de maintenance entrées dans un logiciel de maintenance pourrait être d'automatiser la prise de note après les réparations afin que les descriptions des opérations de maintenance soient faites selon une liste de sélections préétablie en fonction des opérations couramment réalisées pendant la maintenance d'un équipement. Ceci nous permettrait d'obtenir des données sous forme de statistiques, qui pourront être valorisées et mises en valeur grâce à des algorithmes.

F. Aucun procédé n'est mis en place pour valider si les maintenances préventives et correctives sont faites selon les recommandations.

Les interventions de maintenance pour un technicien sont le plus souvent précédées d'une recherche d'informations qui parfois peut prendre des heures afin d'acquérir les connaissances nécessaires pour effectuer une maintenance préventive ou corrective ; ce qui parfois fait perdre du temps aux techniciens par conséquent de l'argent.

Une solution idéale pourrait être d'enregistrer, de centraliser et d'automatiser toutes les procédures de maintenance préventive et corrective des guides d'entretien dans Octopus afin de s'assurer que les procédures suivies par les techniciens soient uniformisées.

G. Les techniciens rédigent un rapport d'interventions sur les équipements biomédicaux qu'ils réparent, mais aucune méthode n'est mise en place pour exploiter ces données afin d'améliorer la maintenance.

Dans le but de pouvoir exploiter les données de maintenance qui existent déjà dans la base de données du département GBM, il pourrait être intéressant d'effectuer un tri de données qui pourront être exploitables, de déterminer leur type et d'utiliser des algorithmes pour les analyser et les mettre en valeur.

H. Aucune fréquence au niveau du suivi des maintenances préventives.

Les observations faites sur les maintenances préventives des équipements nous ont permis de constater que toutes les maintenances qui sont planifiées chaque année ne sont jamais toutes complétées. Ce problème pourrait découler du fait que les techniciens doivent effectuer des heures de recherches pour trouver les procédures de maintenance préventives de certains équipements avant de les appliquer. Il pourrait aussi découler de la perte de temps issue de la mauvaise gestion de la maintenance en général, ce qui retarderait l'exécution des maintenances préventives.

Nous avons déjà mentionné au point E. une solution qui pourrait résoudre ce problème en automatisant la recherche et le suivi des procédures des maintenances.

I. Difficultés à rendre disponibles les équipements pour effectuer les maintenances préventives.

Les difficultés à rendre disponible un équipement pour que les techniciens puissent effectuer la maintenance préventive provient le plus souvent des difficultés à retrouver ou à libérer les équipements, ceci pourrait être interprété comme une conséquence du mauvais suivi au niveau des équipements.

L'automatisation du processus de suivi et de demande des disponibilités des équipements biomédicaux pourrait être un moyen de rejoindre la bonne personne pour proposer des dates d'intervention de maintenance préventive qui pourraient convenir aux techniciens et aux utilisateurs.

Aux vues des observations faites et des améliorations proposées pour faire passer la maintenance biomédicale de l'hôpital Honoré-Mercier vers le 4.0 ; nous pouvons regrouper les solutions proposées de 3 grandes idées :

- La première serait de faire des améliorations au niveau du logiciel de gestion de la maintenance,
- La deuxième serait d'automatiser certaines étapes du processus de la maintenance,
- La troisième serait de porter une attention particulière sur la formation et la certification des techniciens qui sont une de ressources importantes pour le bon fonctionnement du modèle de maintenance 4.0.

4.3 Les Méthodes d'analyse et d'intégration des logiciels de traitement de données de la maintenance existants dans un modèle de maintenance 4.0 : cas de l'hôpital Honoré-Mercier

Les observations et remarques recensées au niveau de la maintenance biomédicale de l'hôpital Honoré Mercier ont été faites en tenant compte de plusieurs volets, à savoir :

- le volet organisationnel (temps et efficacité),
- le volet ressource matériel et logiciel,
- le volet formation et compétences,
- le volet finance,

- le volet innovation.

Les problèmes recensés et les améliorations possibles nous ont permis de proposer dans la section ci-dessus, des solutions qui si elles sont prises en considération pourraient mener à la collecte des données de plusieurs types pendant le processus d'implémentation. Ces données pourront peut-être servir plus tard pour l'analyse et l'intégration des solutions logiciels permettant d'améliorer les services de maintenance biomédicale. Les types d'informations auxquelles nous faisons allusion ici sont :

- Les données des pièces de rechange,
- Les données saisies des rapports d'interventions,
- Les données de procédures de maintenance,
- Les données au niveau des dépenses en réparations,
- Les fréquences au niveau des dysfonctionnements rencontrés sur certains équipements,
- Les pertes de temps et le temps mis pour les entretiens préventifs et correctifs,

L'évaluation des possibilités de valorisation, de création et d'exploitation de ces données pourrait nous conduire à effectuer dans l'ensemble ce qu'on appelle une analyse de maturité numérique.

4.2.3 Analyse de maturité numérique orientée vers un modèle de maintenance 4.0

La maturité numérique c'est bien s'adapter aux changements qui surviennent dans notre environnement. On peut aussi considérer ça comme la capacité des entreprises à mettre à la disposition des clients, des services utiles et pratiques incluant de nouvelles technologies. La maturité numérique a comme objectif :

- i. D'exploiter les nouvelles technologies comme levier pour supprimer les contraintes géographiques, réduire les pertes de temps, faciliter la communication en temps réel, avoir une connaissance des attentes du client grâce aux données et informations recueillies, rendre les processus de travail plus agile, facile d'accès et automatisé au meilleur des cas.
- ii. D'éviter la complaisance en se contentant de ce qu'on fait et de ce qu'on a comme moyens présentement.

- iii. De trouver les compétences nécessaires et requises. Ce principe est valable pour les dirigeants comme pour les employés. Tout ce qui touche les technologies peut changer rapidement, d'où vient l'importance d'être à jour au niveau des compétences et des connaissances.
- iv. De remettre en question les procédés et les méthodes pour se surpasser et être en constante amélioration ou recherche de l'amélioration.
- v. D'éviter de préparer ou d'opérer des changements en ayant peur de nuire au système qui est déjà en place. Il ne faut pas oublier que notre environnement change tout le temps, donc ce qui signifie que même si on n'anticipe pas au niveau des changements, ils arriveront quand même. Ces changements non anticipés pourraient avoir comme conséquence le fait de se retrouver plus tard à offrir des services moins compétitifs et qui répondent moins à la demande.
- vi. De maîtriser son ancien et nouvel environnement et de passer à l'action en cherchant les connaissances et les compétences.

Il faudrait aussi garder en mémoire quand on est dans un processus de migration vers la maintenance 4.0 ou dans un processus d'amélioration des services ; que les données ne nuisent pas à la créativité, mais elles ouvrent des perspectives, surtout pour les entreprises qui ont une certaine réticence à partager des données avec leurs collaborateurs ! L'analyse de la maturité numérique d'une entreprise passe par l'évaluation au préalable de sa capacité numérique.

4.2.3.1 Capacité numérique

L'évaluation des ressources numériques est l'une des étapes les plus importantes du processus d'analyse numérique. Avant l'implémentation du projet de maintenance 4.0, il serait important de faire une évaluation de la capacité numérique du système de maintenance existant, afin de déterminer ce que l'entreprise possède comme valeur ou ressources numériques. Cette évaluation numérique consiste à dresser un portrait spécifique de départ des services de maintenance biomédicale afin de pouvoir déterminer quels sont ses acquis, ses points forts et ses manquements lorsqu'il s'agit des technologies et des communications. Une évaluation des acquis pourrait aussi passer par l'évaluation des habiletés des employés. Elle passerait aussi

par l'évaluation des infrastructures qui serviront à la communication et au partage des ressources.

Il est important pendant l'évaluation de la capacité numérique de bien détailler, définir et présenter les perspectives en incluant le volet financier et même la façon dont le projet sera accueilli par les employés. Ceci permet d'avoir une vue d'ensemble sur tous et d'inclure aussi toutes les variables lorsqu'on veut mettre en place un modèle de maintenance 4.0 qui pourrait potentiellement utiliser les nouvelles technologies.

Toujours dans l'optique de déterminer les fondations de l'entreprise ; il serait important d'évaluer ce que l'entreprise possède comme valeur numérique et comme ressources numériques. Il faudrait aussi évaluer l'état des pratiques de gestion des technologies de l'information et de la communication, le niveau d'habileté et de compétences des employés en ce qui concerne le numérique et les facteurs qui pourraient ralentir ou faciliter l'atteinte des objectifs en ce qui concerne le numérique ou la réalisation du projet.

4.2.3.2 Indices de maturité numérique

Le tableau ci-dessous tiré de l'article << *a new tool for assessing maturity alignment : the enterprise maturity matrix* >> nous montre un modèle référentiel qui pourrait nous permettre d'évaluer la maturité numérique d'une entreprise et de l'associer directement au concept de capacité numérique et à tout projet innovant qui pourrait faire appel à l'utilisation des nouvelles technologies.

Tableau 4.7 Exemple de modèle d'évaluation de la maturité numérique du projet de maintenance 4.0 à l'hôpital honoré Mercier

TABLE 7 THE ENTERPRISE MATURITY MATRIX				
ELEMENTS	MATURITY LEVEL			
	1: START	2: LOW	3: MEDIUM	4: HIGH
Strategy	Short-term goals; no vision	Direction and objectives are identified	Vision and strategy are well developed	Common vision; continuous reevaluation; <i>revitalization crisis</i>
Structure	Simple structure	Structured functionally	Complex structures; <i>red tape crisis</i>	Lean and mean structure
Decision	Centralized	Empowerment is limited; <i>delegation crisis</i>	Empowerment at profit center level	At team and individual levels
Teams	Individual heroics	Task teams	Process teams	Self-managed teams
Systems	Overlapping activities	Unconnected processes	Processes in place	Extended processes
Control	Informal control system	Diagnostic and quality checks	KPI; beliefs; boundaries	Interactive; beliefs; boundaries
Rewards	No formal system	Performance system	Strategic rewards	Balanced measures
HR	Personnel administration	Competency-based practices	Competence management	Continuous workforce improvement
Information flow, IT	Ad hoc use	Improved accessibility	Efficient process	Seamless integration
Style	Directing/telling; <i>leadership crisis</i>	Selling	Delegation with control	Delegating
Staff and skills	Enthusiasm; energy	Technical competences	Disciplined teamwork	Alignment with strategic goals
Shared values, norms	Founders' values	Implicit values	Explicit values	Internalized values
Culture	Adhocracy	Clan	Hierarchy	Market culture

Ce référentiel a pour but de déterminer les objectifs de progression en tenant compte des réalités des processus ou de procédures existant pour ensuite prendre des décisions au niveau des stratégies à adopter.

Nous avons construit un exemple de modèle d'évaluation de la maturité numérique de notre projet de maintenance 4.0 en s'inspirant du tableau 4.7 tiré de l'article << *a new tool for assessing maturity alignment : the enterprise maturity matrix* >>.

En ce qui concerne l'élément de stratégie de l'hôpital Honoré-Mercier, nous leur avons affecté le niveau débutant pour de raison mentionnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.8 Tableau récapitulatif de l'analyse de maturité du département (Maintenance) et Génie biomédical

Éléments	Niveau de maturité attribué	Justificatifs
Stratégie	1-débutant (direction et objectifs identifiés)	<ul style="list-style-type: none"> • Projets à court sur l'organisation, la gestion et la réalisation des travaux de maintenance. • Projet de déménagement de l'atelier de génie biomédical. • Amélioration de leur outil de GMAO (Octopus) • Aucune vision ou aucun développement de stratégies sur l'évolution des technologies médicales et leur environnement. • Chaque technicien décide de la façon dont il gère ses travaux de maintenance sans rendre compte ; ce qui rend difficile la vision commune, le développement des stratégies et la réévaluation continue.

Éléments	Niveau de maturité attribué	Justificatifs
Équipe	1 — Débutant (héroïsme individuel)	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les activités des techniciens sont centralisées autour du système GMAO d'Octopus • Lorsqu'un problème survient, le technicien doit lui-même trouver les outils nécessaires, afin de le résoudre même si ces outils ne sont pas à sa disposition. • Les techniciens travaillent parfois sous pression et doivent trouver des solutions rapides et efficaces de façon instantanée pour résoudre des problèmes de maintenance biomédicale avec peu de moyens.
Système	2— Faible (Processus non connectés)	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les étapes de gestion de la maintenance biomédicale ne sont pas forcément connectées. • Les procédures de maintenance des équipements médicaux ne sont pas liées
Contrôle	1— Débutant (système de contrôle informel)	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun diagnostic ou vérification de qualité de la maintenance effectuée par les techniciens ou les prestataires • La gestion est beaucoup plus basée sur les aspects culturels du département Génie biomédical • – La gestion y est encore focalisée sur le comportement des employés qui affectent le management.

Tableau 4.9 Tableau récapitulatif de l'analyse de maturité du département (Maintenance) et Génie biomédical (suite 1)

Éléments	Niveau de maturité attribué	Justificatifs
Structure	2— Faible (Structurée fonctionnellement)	<ul style="list-style-type: none"> • Les procédures de certains processus ne sont pas vraiment définies et sont parfois informelles. • Le technicien doit parfois décider lui-même des actions et décisions à prendre pour résoudre des requêtes de maintenance. • Le chef de service se fie uniquement à la mention « complétée » des requêtes pour valider si elles ont été résolues.
Décision	3— Medium (responsabilisation au niveau du centre de profit)	<ul style="list-style-type: none"> • Les décisions ne sont pas centralisées • Chaque technicien gère ses propres requêtes selon un planning fixé par lui-même • Une statistique est exploitée par le chef de service afin de s'assurer que les quotas qu'il a fixés sont atteints dans Octopus. • Possibilité de faire porter la responsabilité d'une mauvaise réparation à un technicien.

Éléments	Niveau de maturité attribué	Justificatifs
Récompense	1— Débutant (aucun système formel)	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun système de récompense n'est mis en place. • Aucune possibilité de progression professionnelle pour les employés de la même catégorie. • L'augmentation de la rémunération se fait de façon automatique en fonction de l'ancienneté. • –L'augmentation de la rémunération n'est pas fonction des performances.
Ressources humaines	1— Débutant (Administration du personnel)	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune n'analyse de connaissance et de compétence, les départements sont attribués aux techniciens et ils doivent se débrouiller eux-mêmes pour acquérir les outils nécessaires à sa gestion. • Aucun développement de carrière. • Les administrateurs du Génie biomédical assument la responsabilité de gestion et du développement de leur propre personnel
Flux d'information / Informatique	2— Faible (une accessibilité améliorée)	<ul style="list-style-type: none"> • Peu d'exploitation des ressources informatiques, sauf pour quelques procédures de maintenance et les rapports des requêtes. • Aucune exploitation des informations et données provenant des requêtes et équipements. • Maintenance biomédicale axée sur l'amélioration des paramètres financiers.

Tableau 4.10 Tableau récapitulatif de l'analyse de maturité du département (Maintenance) et Génie biomédical (suite 2)

Éléments	Niveau de maturité attribué	Justificatifs
Style (management, gouvernance)	3— Moyen (Délégation avec contrôle)	<ul style="list-style-type: none"> • Chaque technicien à la gestion de la responsabilité de la maintenance de son département. • Une réunion est effectuée chaque mois pour discuter des problèmes rencontrés dans les départements. • Pas de soutien spécifique apporté aux techniciens. • Beaucoup de contrats de service.
Personnel et compétences	2— Faible (Compétences techniques)	<ul style="list-style-type: none"> • Les compétences techniques sont essentielles pour maintenance biomédicale et gestion du département • Le travail d'équipe n'est appliqué que pour certaines tâches. • Quelques formations à suivre au début et en cours de l'emploi. • Certains techniciens sont parfois envoyés en formation pour un recyclage lorsque c'est obligé.
Valeurs partagées et normes	3— Moyen (valeurs explicites)	<ul style="list-style-type: none"> • Les valeurs sont explicitement définies, • il peut y avoir des problèmes d'interprétation. • Danger de complaisance pour obtenir par exemple des faveurs au niveau des horaires de travail ou de formations. • Recherche de nouvelles valeurs en ajustant les règlements.
La culture	3— Moyen (Hiérarchie)	Culture hiérarchique qui varie en fonction des départements et des catégories des employés.

Ce tableau récapitulatif de l'évaluation de maturité de maintenance biomédicale nous permet de comptabiliser 5 éléments de niveau débutant, 4 éléments de niveau faible et 4 éléments de niveau moyen. Le niveau de maturité de l'hôpital se trouve de façon globale entre le niveau 1 (débutant) et le niveau 3 (moyen), mais si on veut se baser plutôt sur le niveau de maturité affecté au plus grand nombre d'éléments, on pourrait dire que sa maturité serait de niveau 1 ou se trouve entre le niveau 1 (débutant) et 2 (faible).

Après l'évaluation de la maturité numérique de maintenance 4.0 de l'hôpital, on devrait pouvoir apporter de réponses aux questions dans les catégories suivantes :

i. L'Artisanat

Est-ce qu'une utilisation des outils numériques ou objets connectés sera nécessaire pour la réalisation du projet ou sont-ils déjà utilisés ?

Les outils numériques utilisés à l'hôpital honoré mercier sont :

- Octopus (GMAO),
- GRM (logiciel de gestion des commandes),
- Logiciel de transport,
 - Logiciel de sécurité électrique,
 - Appareils et logiciels de recharge des batteries.

Il n'y a pas d'interconnexion entre les équipements et les logiciels d'aide à la maintenance.

La seule interconnexion qu'on peut observer est celle de certains équipements biomédicaux avec les serveurs de télémétrie, les serveurs PACS (pour les images et les fichiers DICOM), MUSE et bien d'autres serveurs qui servent à centraliser les applications médicales.

ii. La discipline

Quelle est la fréquence d'utilisation des logiciels dans le processus de maintenance ?

On observe une utilisation importante des logiciels dans le processus de maintenance biomédicale. Octopus, GRM, les logiciels de sécurité électrique, les applications de recharge de batteries et les logiciels spécialisés du manufacturier pour la maintenance préventive sont des logiciels d'aide à la maintenance qui sont utilisés assez fréquemment.

iii. L'intégrité

Quel est le niveau d'intégrité des logiciels et application de maintenance ?

Le logiciel de GMAO Octopus est censé servir à la centralisation des informations de maintenance, mais à cause du contexte de maintenance interne et externe ; les informations sont partagées entre le service GBM de l'hôpital et les entreprises prestataires externes et ces deux entités ne les partagent pas forcément.

À cause du manque de suivi et de rigueur dans les processus de maintenance et la manipulation de données ; on observe une fuite et une non-centralisation de toutes les données. Ceci est dû au fait que les techniciens n'utilisent pas le logiciel GMAO (Octopus) pour la sauvegarde et l'exploitation des données. Comme exemple, nous avons la conception des fichiers Excel pour la sauvegarde des données et la sauvegarde de certaines informations dans des dossiers sauvegardés sur l'ordinateur qui ne sont pas des serveurs.

iv. La prédictivité

Est-ce qu'il possède un historique de données et des outils numériques de maintenance à temps réel qui permettent d'ajuster des actions et de prendre des décisions ?

Dans un projet de maintenance 4.0, le modèle prédictif est l'un des objectifs finaux à atteindre pour avoir un système de maintenance presque autonome ; permettant de prévoir bien en avance les défaillances sur les équipements biomédicaux et d'anticiper sur les réparations. Ce modèle de maintenance utiliserait les données collectées issues de l'historique des paramètres de dégradation qu'on aimerait suivre ; mais dans le cadre du projet à l'hôpital honoré Mercier

il serait fastidieux de faire un suivi individuel des paramètres de chaque équipement à cause du nombre important d'appareils médicaux et de la confidentialité des informations au niveau des entreprises manufacturières.

Pour implanter un modèle prédictif à l'hôpital Honoré-Mercier, il serait préférable de commencer par :

- Suivre la fréquence à laquelle les équipements tombent en panne,
- Suivre les pièces qui sont le plus souvent remplacées,
- Effectuer une surveillance routinière des fonctionnalités des équipements,
- Effectuer une meilleure centralisation et intégration des données recueillies,
- Suivre les rapports d'activités des réparations dans une base de données afin qu'elles puissent servir après analyse pour anticiper sur les réparations.

Si on voulait mettre en place un modèle prédictif permettant de suivre individuellement chaque appareil médical, il faudrait collaborer avec les entreprises manufacturières pour avoir accès aux informations de construction d'équipements afin d'effectuer les ajustements nécessaires pour collecter les données et suivre la santé des équipements à temps réel.

v. L'autonomie

Est-ce que le système de maintenance est autonome ?

Les Technologies de traçabilité des informations et des données sont des moyens importants pour garantir l'autonomie d'un système de maintenance. Un des critères importants pour pouvoir assurer l'autonomie du système de maintenance biomédical serait la centralisation de toutes les données et procédures en lien avec la maintenance biomédicale dans un serveur pour qu'on puisse y avoir accès en tout temps même en cas de remplacement d'un technicien.

Un des aspects qui serait aussi important lorsqu'on voudrait mettre en place un modèle prédictif de maintenance biomédicale, c'est la durée de vie de certains équipements. Afin d'appliquer une procédure de maintenance 4.0, il serait important de s'assurer qu'il ait une durée de vie assez importante pour avoir le temps de collecter les données et de les exploiter plus tard pour

la maintenance prédictive du même type d'équipement s'il n'est pas remplacé par un autre. Le domaine médical est un environnement où certains équipements peuvent être remplacés après un temps court, ce qui ne permettrait peut-être pas d'avoir suffisamment de données pour mettre en place un modèle prédictif de maintenance. Il est aussi important de considérer le fait que si le fabricant change de technologies lors du remplacement d'un équipement, il faudra donc peut-être réadapter le processus d'automatisation de la maintenance s'il n'y a pas de similarité avec le précédent.

4.2.3 Proposition de choix d'algorithmes

Pour être en mesure de proposer un algorithme de traitement de données qui pourrait être adéquat et qui contribuerait à rendre le système de maintenance biomédicale plus autonome, automatique et prédictif; nous allons suivre la procédure de choix d'un algorithme de traitement de données énoncée à la section 2.2.1 du chapitre 2. Cette section mentionne certaines questions auxquelles il faudrait y répondre pour être en mesure de faire un choix d'algorithme et nous allons y répondre en tenant compte du contexte de maintenance biomédicale à l'hôpital honoré Mercier. Nous allons y répondre aussi en proposant des algorithmes de traitement de données. Ces questions sont les suivantes :

- i. La sauvegarde des données existe-t-elle déjà ou est-elle nécessaire ? Quels sont les types de données existantes qui seront intégrées dans l'algorithme ?**
- ii. Quelle taille de données devra être sauvegardée pour que notre modèle de classification soit efficace ?**
- iii. Quelles sont la validité et la pertinence des données déjà existantes ?**
- iv. Sur quelle durée ont été sauvegardées les données déjà existantes ?**

Dans ce paragraphe, nous allons apporter des réponses aux 5 questions posées ci-dessus en lien avec l'analyse des possibilités du déploiement d'une maintenance 4.0 à l'hôpital honoré Mercier.

Les seules données sauvegardées présentement à Honoré Mercier sont celles des rapports des réparations des équipements, des rapports de réparations et d'intervention sur des équipements sous contrat de service, des manuels de sévices, d'équipements, des procédures de maintenance préventive, des historiques des maintenances préventives, des inventaires du plateau technique de l'Hôpital et des pièces de remplacement en réserve, etc. Toutes ces informations que nous venons de mentionner sont stockées dans le logiciel GMAO Octopus et dans des fichiers individuels des techniciens. Toutes ces informations sont intéressantes et sauvegardées depuis de multiples années (plus de 5 ans environ), mais la raison pour lesquelles elles ne peuvent être utilisées pour construire notre modèle de données ; seraient de ne pas être pertinentes. Les contenus des rapports sont très souvent vagues et non explicites, les données sont souvent erronées et sauvegardées de la mauvaise façon. Toutes ces insuffisances pourraient peut-être s'expliquer par le fait qu'il n'y ait pas de technique ou de procédure qui définissent la façon dont les données doivent être sauvegardées.

Afin de proposer une réponse à cette question, nous suggérons que la sauvegarde et la validation des données soient faites, et ce en respectant des procédures uniques qui auraient été définies au préalable. Le choix des procédures et des caractéristiques de sauvegarde des données devrait se faire en fonction des objectifs de maintenance 4.0 préétablis. Les données qu'il serait possible de sauvegarder pourraient être de :

- Type numérique, exemple : les statistiques des pièces de rechange, la fréquence d'apparition d'une même panne sur un même type d'équipement, le temps de réparation des équipements, les données issues des tests de sécurité électrique, etc.
- Type texte, exemple : les notes des rapports issues des réparations des équipements.

La taille et la durée pendant laquelle les données doivent être sauvegardées ne peuvent être fixes au départ pour ce projet si on ne possède des données préalablement stockées comme dans notre cas. Pour cet hôpital, nous suggérons donc que les données soient d'abord sauvegardées selon des critères bien définis et que la taille optimale des données nécessaires au bon fonctionnement des algorithmes soit calculé et ajusté pendant qu'ils seront en fonctionnement.

La deuxième série de questions en rapport avec le choix des algorithmes de traitement des données est la suivante :

v. Quelle est ou quelle sera la fréquence d'enregistrement des données ?

Les données déjà présentes dans la base de données du logiciel de GMAO (Octopus) proviennent pour la plupart de la saisie manuelle des informations par les employés. Elles sont présentement sauvegardées chaque jour et doivent continuer de l'être pour que les notes de rapport et les informations numériques saisies puissent être rapportées avec le plus de détails et de précisions possible.

vi. À quelles fins sont et seront utilisées les données ?

Les données actuellement présentes dans les bases de données et qui sont correctement sauvegardées servent le plus souvent à la recherche d'informations. Elles sont utilisées pour facilement retrouver les caractéristiques et les requêtes qui ont déjà été effectuées sur des équipements. Pour une amélioration du fonctionnement de la maintenance biomédicale et une migration vers une maintenance intelligente, nous suggérons que les données soient utilisées pour la recherche d'informations et une fois les données analysées, elles devront servir aux alertes, à la prédiction, au tri de données, à l'analyse économique, à la gestion des priorités afin de prévoir les maintenances préventives et correctives avant que l'équipement ne brise.

vii. Sous quelles formes seront retournées les données traitées par les algorithmes ?

Les données seront retournées sous formes individuelles (numérique ou texte) dans le cas d'une recherche d'informations, sous forme de tableau ou diagramme dans le cas d'une analyse financière, sous forme d'alerte ou de recommandation (numérique ou texte) dans le cas d'une analyse globale des données pour la maintenance prédictive.

viii. Comment seront interprétées les données ?

Les données seront analysées toutes ensemble pour construire le modèle d'apprentissage de données et seront ensuite comparées une par une au modèle de classification de données pour savoir si elles sont saines ou pas. Cette façon d'interpréter les données une par une permettra

de suivre des paramètres spécifiques révélateurs de la santé des équipements. Une autre façon d'interpréter les données de maintenance biomédicale pourrait être par évaluation des données ou calculs statistiques pour déterminer l'efficacité de fonctionnement du système de maintenance ; comme exemple, ces calculs statistiques peuvent nous renseigner sur l'exploitation du budget de maintenance en temps réel.

4.3 Analyses des réponses aux questions et propositions de quelques algorithmes pour la construction d'un modèle d'apprentissage de données.

Si on se base sur les réponses apportées aux questions posées ci-dessus et sur l'arbre de décision pour le choix d'un algorithme de la figure 2.1 que nous avons mis en place ; nous pouvons suggérer le cheminement suivant pour faire le choix de l'algorithme qui sera utilisé pour rendre intelligente la maintenance biomédicale à l'hôpital honoré Mercier :

A. Nous répondrons au premier niveau de question que pose notre arbre décisionnel en disant que la maintenance sera non connectée pour les équipements qui sont critiques ou non fonctionnels et dépendamment du type de panne ; aussi pour certains équipements biomédicaux il serait quasiment impossible d'effectuer une maintenance pendant que l'équipement est en utilisation sur un patient. Les données recueillies lors des réparations serviront ensuite introduites dans les approches pronostiques des maintenances en ligne pour prévoir les éventuelles futures pannes. On peut conclure que les maintenances en ligne et hors ligne devraient toutes les deux être utilisées.

B. Si nous considérons la maintenance en ligne, la réponse à la question de l'arbre décisionnel concernant le fait que les propriétés statistiques changeraient ou pas jusqu'à la détection d'une prochaine anomalie ; nous pouvons répondre oui et non. Compte tenu du fait que ça pourrait dépendra du type d'équipement analysé. Comme exemple si on considère les données provenant du test de sécurité électrique d'un équipement, on pourrait se poser la question de savoir si les valeurs mesurées de la tension de mise à la terre et du courant de fuite restent inchangées jusqu'à ce qu'on observe une anomalie sur cet équipement. Ceci nous amènera donc à effectuer une analyse Data Driven ou modèle Driven qui se rapproche plus de

l'intelligence artificielle. Dans notre mémoire, nous ne parlerons que modèle Driven étant donné que nous n'avons pas lu des articles en rapport avec la méthode Data Driven.

- C. En ce qui concerne la méthode data Driven, nous pouvons avoir une étude statistique ou une étude appelée Machine Learning sur les données.
- D. Si on considère l'étude statistique et qu'on se pose la question de savoir si on connaît la distribution statistique des données collectées ; la réponse serait non étant donné que nous n'avons aucune information au préalable sur les paramètres des équipements. Ceci nous conduira à effectuer une étude non paramétrique donc à proposer les méthodes suivantes pour la construction du modèle de maintenance intelligente :

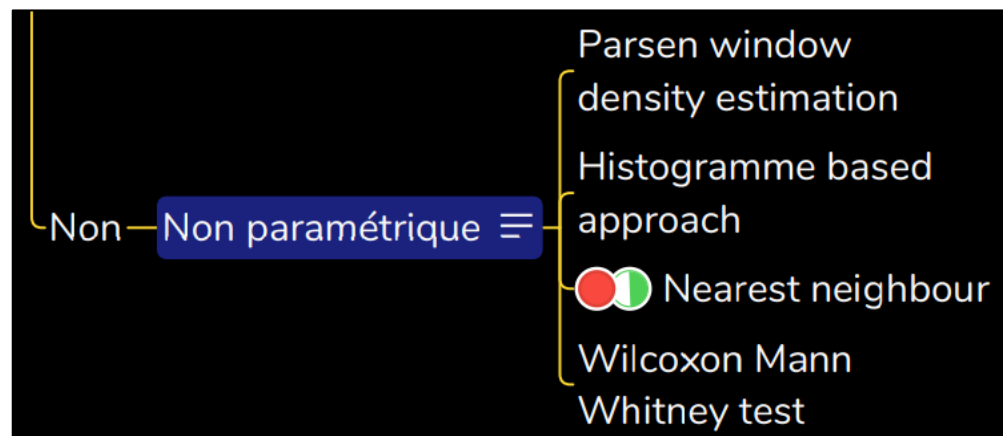


Figure 4.2 Méthodes d'algorithmes non paramétriques sélectionnées à partir de l'arbre décisionnel (figure 2.1)

- E. Si on considère l'étude statistique et qu'on se pose la question de savoir si on possède des données des équipements lorsqu'ils sont saints ou endommagés ; la réponse serait non étant donné que les seules données que nous possédons sur les équipements ne sont pas pertinentes et bien enregistrées. Ceci nous conduira à effectuer une étude non supervisée donc à proposer les méthodes suivantes pour la construction du modèle de maintenance intelligente :

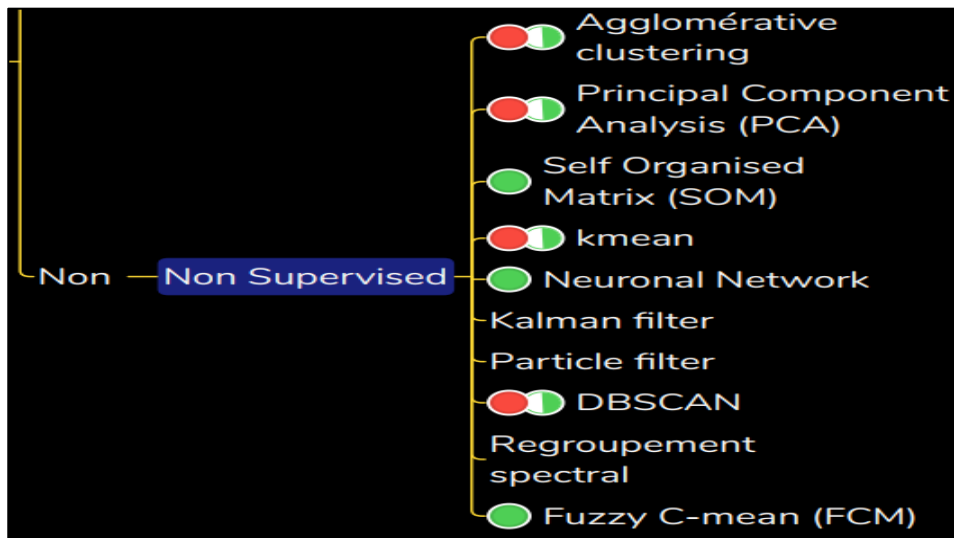


Figure 4.3 Méthodes d'algorithmes non supervisées sélectionnées à partir de l'arbre décisionnel (figure 2.1)

4.4 Proposition d'une feuille de route en vue d'une éventuelle implémentation d'un modèle de maintenance 4.0 à Honoré-Mercier

Une feuille de route est un outil qui permet de présenter de façon simplifiée les objectifs et les livrables du projet. Les tâches à effectuer, les objectifs à atteindre et les livrables sont présentés selon une progression de temps définie ; ce qui permet de mieux organiser le chevauchement, l'enchaînement des tâches et la coordination des activités avec les autres collaborateurs du projet. Elle est généralement conçue pour simplifier et faciliter la communication d'une vision et des idées sur un projet. Les éléments importants qu'on doit retrouver dans une feuille de route sont les suivants :

- A. Les étapes et livrables importants,
- B. Le calendrier,
- C. Les risques,
- D. La finalité et les objectifs du projet,
- E. Les finances.

Dans la confection de notre feuille de route, nous n'avons pas inséré une planification budgétaire à cause du manque d'informations. Les données d'erreurs ou de dysfonctionnement

sont effectivement présentes dans certains des équipements déjà en place et ces données peuvent être exploitées pour effectuer une maintenance intelligente connectée. Nous ne détaillerons pas les étapes de l’aspect maintenance intelligentes connectées dans notre feuille de route, car elle nécessiterait en soi la confection d’une autre feuille de route pour détailler ces étapes qui en soi constitueraient un projet entier. Dans la confection de notre feuille de route, nous nous sommes focalisés sur les aspects qu’on pourrait améliorer afin que le modèle de maintenance de l’hôpital Honoré-Mercier puisse se rapprocher d’un modèle de maintenance 4.0 plus automatique et plus autonome.

La figure 4.7 ci-dessous est un aperçu d’une feuille de route que nous avons mis sur pied pour faciliter la visualisation des étapes du projet à réaliser qui pourrait permettre d’aboutir à la mise en place d’un modèle de maintenance 4.0.

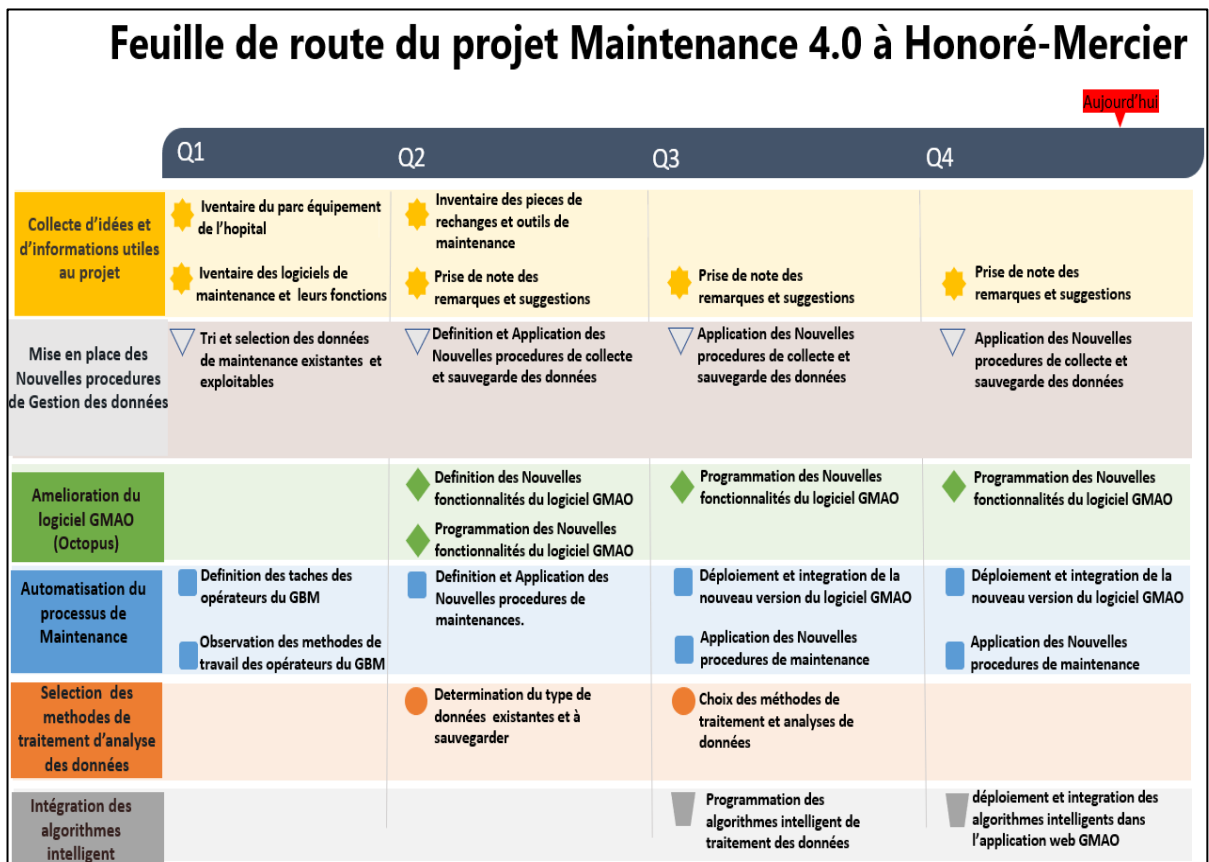


Figure 4.4 Feuille de route proposée pour le projet de Maintenance 4.0 à Honoré-Mercier

Comme on peut le voir dans la figure 4.7, les suggestions des principales étapes pour la réalisation ce projet est les suivantes :

i. La collecte d'idées et d'informations utiles au projet

Cette première phase du projet débute généralement par des rencontres entre les principaux acteurs du projet pour échanger sur les travaux à effectuer, les possibilités, le potentiel du projet, les attentes et les bénéfices de mettre sur pied le projet, les moyens mis à disposition pour la réalisation du projet et aussi pour discuter des suggestions que chacune des parties apporterait. Dans cette phase, il serait toujours intéressant d'effectuer une inspection de l'hôpital et un état de lieux pour recenser ce qui existe déjà comme installations et de ressources matérielles ou logiciels, mais après ces étapes traversées, il serait toujours judicieux de continuer à effectuer des rencontres ou des réunions pour discuter de nouvelles suggestions qui pourraient provenir de différentes parties, comme on peut le voir jusqu'à la phase Q4 dans la figure 4.7.

ii. La mise en place des nouvelles procédures de gestion des données.

Beaucoup d'entreprises aujourd'hui se sont lancées dans la collecte des données afin d'avoir les bonnes connaissances ou les bons outils pour les exploiter tout de suite. Ces données restent quand une mine d'or et pourront être une source importante d'informations capitales pour l'avancement et l'amélioration des services biomédicaux. Dans cette deuxième phase du projet, il s'agirait d'effectuer un tri et une sélection des données de maintenance existantes et exploitables. Après avoir effectué un tri de données, la suite consisterait à introduire ces données dans un nouveau système, qu'on définirait. L'objectif est de définir et mettre en application le plus tôt possible de nouvelles procédures de collectes et de sauvegarde des données afin de commencer à avoir les bonnes pratiques de maintenance et de sauvegarde de données conformes qui seront exploitées plus tard lorsque le système automatisé d'analyse et de traitement des données sera prêt. Cette tâche sera exécutée jusqu'à la période Q4 de fin de réalisation de projet.

iii. Améliorations du logiciel GMAO (octopus)

Un logiciel GMAO est une application de gestion de la maintenance qui est utilisée comme, interface, serveur et base de données pour toutes informations en lien avec la maintenance biomédicale. Celui de l'hôpital Honoré-Mercier s'appelle Octopus et c'est un outil essentiel qui est au cœur de la maintenance et qui permet de mieux gérer la recherche d'informations sauvegardées. Le problème avec ce logiciel pour l'instant est qu'il est sous-exploité et très limité. Donc l'objectif dans cette troisième phase serait de définir de nouvelles fonctionnalités utiles qu'on souhaiterait avoir, mais qui ne seraient pas encore intégrées dans le logiciel et les programmer. L'étape de programmation du logiciel va se dérouler jusqu'à la période Q4 afin que des corrections puissent être effectuées et déployées à tout moment ; c'est pour cette raison que pour le logiciel GMAO nous recommanderons toujours de le programmer en explication web afin que le déploiement des nouvelles versions soit facile et puisse se faire à distance.

iv. Automatisation du processus de maintenance

L'automatisation du processus de maintenance commence par la définition des tâches en lien avec la maintenance des principaux acteurs (techniciens, ingénieurs, chef de service, directeur technique, etc.) du GBM. Après avoir défini leurs tâches, il faudrait observer leurs méthodes de travail pour être en mesure par la suite de détecter les procédures qui sont à réviser, à garder ou à automatiser. Ceci nous permet donc de définir et d'appliquer de nouvelles procédures en lien avec les changements qu'on souhaiterait effectuer. Ces procédures vont être déployées dans le nouveau logiciel Octopus pendant la période Q3 et vont continuer d'être appliquées jusqu'à la fin du projet et vont demeurer par la suite. Le déploiement de l'application va aussi continuer et va demeurer même après avoir terminé le projet pour être en mesure de continuer à intégrer dans Octopus des nouvelles fonctionnalités provenant des remarques et suggestions des utilisateurs.

v. Sélection des méthodes de traitement et d'analyses des données

Il serait recommandé de commencer la sélection des méthodes de traitement et d'analyses de données à partir de la période Q2 après qu'on ait terminé d'effectuer une inspection et un état

des lieux pour savoir ce qu'on possède comme moyens matériels et logiciels et les types de données suggérées ou déjà utilisées dans le système de maintenance. Le choix des méthodes de traitement et d'analyses qui correspondrait à notre système de maintenance pourrait se faire à partir de la période Q3 en utilisant les recommandations faites à la section 2.2.1 du chapitre 2, une fois qu'on aurait commencé le déploiement des nouvelles fonctionnalités du logiciel GMAO.

vi. Intégration des algorithmes intelligents

La dernière phase du projet consisterait à effectuer la programmation, le déploiement et l'intégration des algorithmes intelligents de traitement et d'analyses des données de maintenance biomédicale dans l'application web GMAO. Nous avons décidé, dans nos recherches, de ne pas développer cet aspect, car il nécessiterait la collecte et l'analyse spécifique des données de maintenance ; ce qui en soi est un aspect qui peut être assez complexe et qui nécessiterait d'être traité dans un autre sujet de recherche.

Nous avons été capables dans l'étude de notre deuxième cas pratique d'exploiter les outils et la méthode présentée dans les chapitres 1 et 2 afin de réaliser une analyse complète du département génie biomédical. L'analyse de son système de maintenance est l'une des étapes préliminaires à l'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0. Grâce à l'étude de son principe de fonctionnement et la vigie technologique, nous avons pu proposer des solutions personnalisées d'amélioration des services de maintenance afin de leur permettre d'avoir un modèle de fonctionnement qui serait propice à accueillir un modèle de maintenance 4.0. Une étude de maturité numérique des services de maintenance biomédicale nous a révélé que le niveau de maturité se situerait en majorité entre niveaux début et moyen selon l'outil d'évaluation utilisé, avec un nombre d'éléments évalués qui serait en majorité dans la case faible. En utilisant l'outil d'aide au choix d'algorithme de maintenance développé, nous avons pour cette organisation porté notre choix sur des algorithmes non paramétriques ou non supervisés. Nous avons proposé une méthode d'intégration des logiciels de maintenance et feuille de route qui pourrait les guider dans le processus de transformation et d'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0. Après avoir identifié clairement les étapes préliminaires de l'implémentation d'un modèle de maintenance 4.0, les préoccupations suivantes pourraient être de savoir comment l'installer et le connecter. Quels seraient les avantages de mettre sur pied un tel projet ?

CHAPITRE 5

EXEMPLE DE VALORISATION DE DONNÉES DE DYSFONCTIONNEMENT : CAS DE LA MINE D'ELDORADO GOLD QUÉBEC

Eldorado Gold Québec est une industrie minière installée dans le nord du Québec et plus précisément en Abitibi, qui exploite des minerais d'or. L'introduction de ce troisième cas dans la recherche d'une méthodologie d'implantation d'un modèle de maintenance 4.0 nous permettra d'avoir un aperçu du bénéfice qu'on pourrait tirer des données une fois qu'elles sont valorisées. Comment pourrait-on valoriser et synthétiser des données de dysfonctionnement et quelles informations pourrait-on en tirer ? Afin d'apporter une réponse à cette question, nous commencerons par effectuer une mise en contexte du projet de valorisation des données à la mine. Ensuite, nous évaluerons la maturité numérique de la mine et présenterons un des principes de valorisation des données du diagramme en baignoire. Enfin, nous donnerons quelques exemples de valorisation des données que nous avons effectuées dans le cadre du projet NewTrax à la mine Eldorado Gold Québec.

5.1 Mise en contexte du projet de valorisation des données d'alarmes des camions de la mine

L'ensemble des activités de la mine est continué des opérations sous terre et en surface. Ces deux grands groupes d'activités sont subdivisés en plusieurs étapes qui sont surveillées par la salle de contrôle. L'ensemble de ses activités sont réalisées par plusieurs groupes comme on peut le voir sur la figure 5.1 suivante :

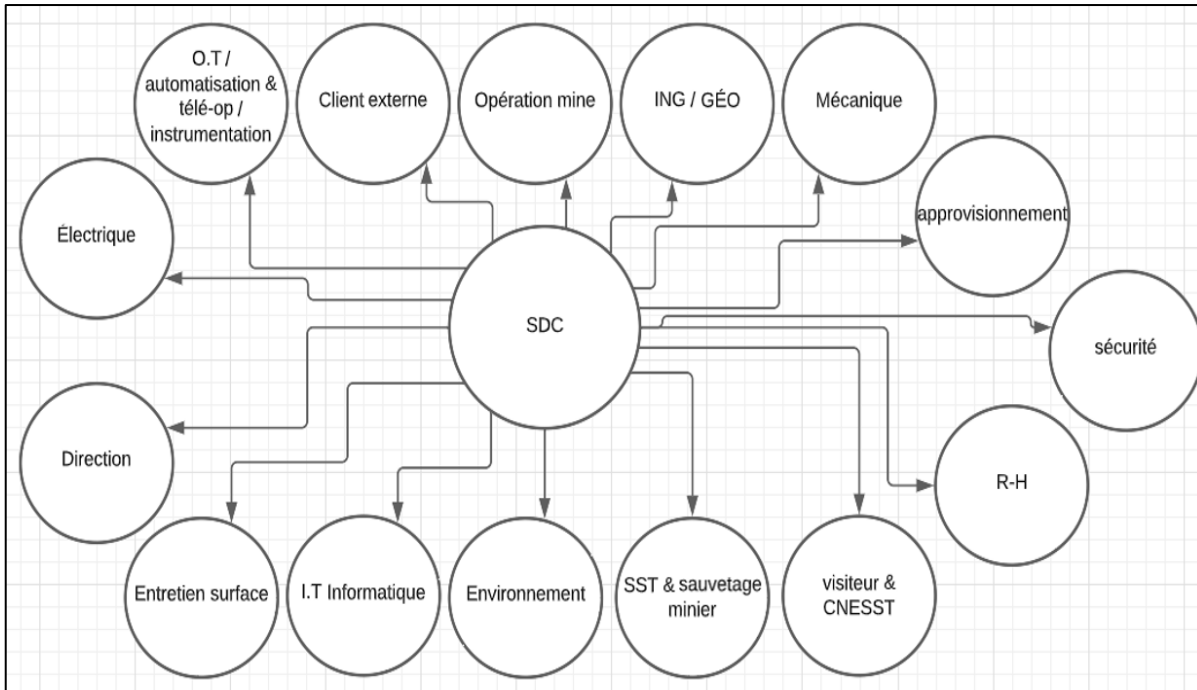


Figure 5.1 Organisation du flux d'informations vers la salle de contrôle à la mine Eldorado Gold Québec

Ces équipes se succèdent au niveau des activités de la mine afin d'effectuer la coordination des activités, l'étude des sols, le développement de la mine, la production et le transport des minerais, l'approvisionnement en matériaux et en ressources, la sécurisation et la construction des nouveaux sites de production.

Comme on peut le voir sur la figure 5.1 ci-dessus, tous départements communiquent avec la salle de contrôle qui est le centre de surveillances d'activités sous terre.

La salle de contrôle reçoit tous les appels mécaniques, électriques et opérationnels des opérateurs sous terre et doivent par la suite mettre à jour les données dans le système Imagine qui permet d'avoir les bonnes informations en temps réel pour la documentation et la prise de décision. Par exemple, le contrôle de la ventilation sous terre, les bris d'équipement et la demande de réparation, la planification des arrêts opérationnels sous terre, etc.

L'installation de la télémétrie venant d'être complétée, la mine est maintenant en mesure d'avoir des données en temps réel sur leur ensemble de véhicules de production qui est l'un des éléments essentiels de leurs activités.

Le but ultime de la télémétrie et de ce projet sera de faire de la salle de contrôle, un « dispatch » en temps réel des opérations minières. Le fait d'avoir des prises de décisions basées sur les données des alarmes des camions qui sont valorisées contribuerait à rendre la mine autonome ainsi qu'à standardiser les prises de décisions.

L'installation de la télémétrie a fait naître le projet Newtrax qui permet de mettre en place un système de sauvegarde et d'analyse des données des alarmes mécaniques et opérationnelles des camions. Les plateformes utilisées pour réaliser ces tâches sont, « intégra production », « MET Reporter et Analyzer » et « Power Bi ». Ces outils sont des serveurs et des plateformes qui permettent de sauvegarder et gérer une capacité importante de données.

Ce projet leur permettra d'accroître le niveau de maturité de leur organisation et se rapprocher vers un modèle futur de maintenance 4.0.

5.2 Matrice de maturité

On constate en faisant l'évaluation de la maturité numérique de la mine Eldorado Gold Québec que certains des paramètres évalués ont des scores de maturité similaires à ceux l'hôpital qui est une organisation d'un autre type. En comparant le reste des paramètres avec ceux de l'hôpital, on peut constater qu'ils ont un score de maturité supérieure, ce qui peut être justifié par le fait que la mine est une d'exploitation donnée un peu plus avancée. Ce niveau d'exploitation des données un peu plus avancé peut se traduire par valorisation des données qu'on verra dans la section suivante.

Tableau 5.1 Évaluation d'indices des maturités numériques de la mine Eldorado Gold Québec

TABLE 7 THE ENTERPRISE MATURITY MATRIX				
ELEMENTS	MATURITY LEVEL			
	1: START	2: LOW	3: MEDIUM	4: HIGH
Strategy	Short-term goals; no vision	Direction and objectives are identified	Vision and strategy are well developed	Common vision; continuous reevaluation; <i>revitalization crisis</i>
Structure	Simple structure	Structured functionally	Complex structures; <i>red tape crisis</i>	Lean and mean structure
Decision	Centralized	Empowerment is limited; <i>delegation crisis</i>	Empowerment at profit center level	At team and individual levels
Teams	Individual heroics	Task teams	Process teams	Self-managed teams
Systems	Overlapping activities	Unconnected processes	Processes in place	Extended processes
Control	Informal control system	Diagnostic and quality checks	KPI; beliefs; boundaries	Interactive; beliefs; boundaries
Rewards	No formal system	Performance system	Strategic rewards	Balanced measures
HR	Personnel administration	Competency-based practices	Competence management	Continuous workforce improvement
Information flow, IT	Ad hoc use	Improved accessibility	Efficient process	Seamless integration
Style	Directing/telling; <i>leadership crisis</i>	Selling	Delegation with control	Delegating
Staff and skills	Enthusiasm; energy	Technical competences	Disciplined teamwork	Alignment with strategic goals
Shared values, norms	Founders' values	Implicit values	Explicit values	Internalized values
Culture	Adhocracy	Clan	Hierarchy	Market culture

Tableau 5.2 Justificatifs des scores de maturité numériques attribués à chaque indice

Éléments	Niveau de maturité attribué	Justificatifs
Stratégie	2— Faible (les orientations et les objectifs sont identifiés)	<ul style="list-style-type: none"> • Projets à court long terme dans l'organisation, la gestion et la réalisation des travaux de maintenance. • Projet de télémétrie et de cartographie en des processus en cours, afin d'améliorer les pratiques et les méthodes de travail. • Amélioration de leurs outils de GMAO avec le projet Newtrax • Une vision et un développement des stratégies sur l'évolution des technologies qui est existante, mais n'est pas encore bien définie. • Une harmonisation des opérations de maintenance qui est en cours, mais pas encore bien établie.
Structure	3— Moyen (Structures complexes ; Crise de la bureaucratie)	<ul style="list-style-type: none"> • Les procédures de certains processus sont définies, mais sont parfois informelles. • Certaines actions de maintenance et décisions à prendre pour résoudre des requêtes de maintenance sont prises à un début d'exploitation des données du projet Newtrax. • Le chef de service ne se fie pas uniquement à la mention « complétée » des requêtes pour valider si elles ont été résolues. • Les grands projets réalisés pour rendre la mine autonome et intelligente et ne sont pas encore terminés. • La structure est encore en pleine transition et au début de son avancée vers un modèle de maintenance 4.0

Éléments	Niveau de maturité attribué	Justificatifs
Décision	3—Medium (Autonomisation au profit du Niveau central)	<ul style="list-style-type: none"> • Les décisions ne sont pas centralisées • Chaque Département gère ses propres requêtes selon leur planning. • Des statistiques sont exploitées par les chefs des services afin de s'assurer que les quotas qu'il a fixés sont atteints. • Possibilité de remonter jusqu'à la source pour savoir à qui imputer la responsabilité lorsqu'il y a un incident majeur.
Équipe	3 — Moyen (Équipes de processus)	<ul style="list-style-type: none"> • L'ensemble des équipes sont constituées et identifiées de façon distincte en fonction des processus. • Toutes les activités des opérateurs sont centralisées autour d'un système et des objectifs bien définis. • Lorsqu'un problème survient, l'opérateur ou le technicien peut intervenir seul pour résoudre le problème, mais des réunions générales sont organisées fréquemment afin de discuter des résolutions aux problèmes majeurs reliés aux processus. • Les techniciens n'agissent pas seuls et de façon instantanée pour résoudre un problème lorsqu'ils n'ont pas reçu la formation nécessaire. • – Les équipes ou les départements doivent quand même rendre des comptes régulièrement à la direction sur le déroulement des activités.

Tableau 5.3 Justificatifs des scores de maturité numériques attribués à chaque indice
(suite 1)

Éléments	Niveau de maturité attribué	Justificatifs
Système	2— Faible (Processus non connectés)	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les étapes de gestion de la maintenance ne sont pas forcément connectées. • – Les processus commencent à être bien définis, mais ne sont pas encore totalement connectés
Contrôle	2— Faible (Diagnostic et Contrôles de qualité)	<ul style="list-style-type: none"> • Des contrôles qualité sont effectués régulièrement en ce qui concerne l'exploitation de la mine et les mesures de sécurité • La gestion est basée sur les aspects culturels du département et un début d'exploitation des données issues des nouvelles technologies. • La gestion n'est pas focalisée sur le comportement des employés, mais plutôt sur l'atteinte des objectifs et la cohésion du groupe.
Récompense	2— Faible (Système de performance)	<ul style="list-style-type: none"> • Un système de récompense focalisé sur la performance des opérateurs et l'atteinte des objectifs. • Possibilités de progression professionnelle pour les employés de la même catégorie. • L'augmentation de la rémunération se fait de façon automatique en fonction de l'ancienneté et grâce aux promotions. • – L'augmentation de la rémunération est fonction des performances.

Éléments	Niveau de maturité attribué	Justificatifs
Ressources humaines	2— Faible (Système d'administration basé sur les compétences pratiques)	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse de connaissance et de compétences. Aucun opérateur ne peut effectuer une action s'il n'a pas les compétences nécessaires et n'a pas complété sa formation. • Développement de carrière basée sur les compétences. • Les administrateurs assument la responsabilité de gestion et du développement de leur propre personnel • La compétence en management n'est pas indispensable pour le déroulement des activités.
Flux d'information/ Informatique	2— Faible (une accessibilité améliorée)	<ul style="list-style-type: none"> • Un début d'exploitation des ressources informatiques pour quelques procédures de maintenance et de gestion. • Un début de valorisation des données d'activités et d'alarmes des camions avec le projet de télémétrie. • Aucune exploitation des informations et données provenant des requêtes et équipements. • Maintenance axée sur l'amélioration des paramètres financiers.
Style (management, gouvernance)	3— Moyen (Délégation avec contrôle)	<ul style="list-style-type: none"> • Chaque technicien à la gestion de la responsabilité de la maintenance des camions, mais sous la supervision de leur chef de service. • Une réunion est effectuée début de semaine et/ou du mois dépendamment du département, pour discuter des problèmes rencontrés dans les départements. • Soutien apporté aux opérateurs en cas de nécessité. • – Beaucoup de contrats de service.

Tableau 5.4 Justificatifs des scores de maturité numériques attribués à chaque indice (suite 2)

Éléments	Niveau de maturité attribué	Justificatifs
Personnel et compétences	3—Moyen (Travail d'équipe discipliné)	<ul style="list-style-type: none"> • Les tâches sont réalisées en parallèle ou en chaînes par différentes équipes (y compris le département de maintenance) pour atteindre les objectifs journaliers. • Le travail d'équipe est appliqué dans la grande majorité des tâches. • Quelques formations à suivre au début et en cours de l'emploi pour obtenir des cartes de compétences. • Les opérateurs sont envoyés en formation pour un recyclage lorsque régulièrement.
Valeurs partagées et normes	3— Moyen (valeurs explicites)	<ul style="list-style-type: none"> • Les valeurs sont explicitement définies • Il peut y avoir des problèmes d'interprétation. • Danger de complaisance pour obtenir par exemple des faveurs au niveau des horaires de travail ou des formations. • Recherche de nouvelles valeurs en ajustant les règlements.
La culture	3—Moyen (Hiérarchie)	<ul style="list-style-type: none"> • Culture hiérarchique qui varie en fonction des départements et des catégories des employés.

Le tableau ci-dessus nous donne les raisons pour lesquelles nous avons attribué à chaque élément les niveaux de maturités qui y figurent.

5.3 Principe de valorisation des données de dysfonctionnement

Le principe de valorisation des données de maintenance est une des premières étapes d'un grand pas vers un modèle de maintenance 4.0. Comme on peut le voir sur la figure 5.2, le taux de défaillance dans le cycle de vie d'un équipement est souvent très élevé lorsqu'il est au début de sa vie, et certains sont même souvent amenés à mourir au début de leur vie (mortalité infantile). La mortalité infantile ou le taux de défaillance élevé en début de vie sont souvent causés par les éléments suivants :

- Le défaut de fabrication,
- Le manque de contrôle de qualité,
- Les défauts de conception,
- Les défauts d'assemblage,
- La contamination (souvent causée par les erreurs d'utilisation).

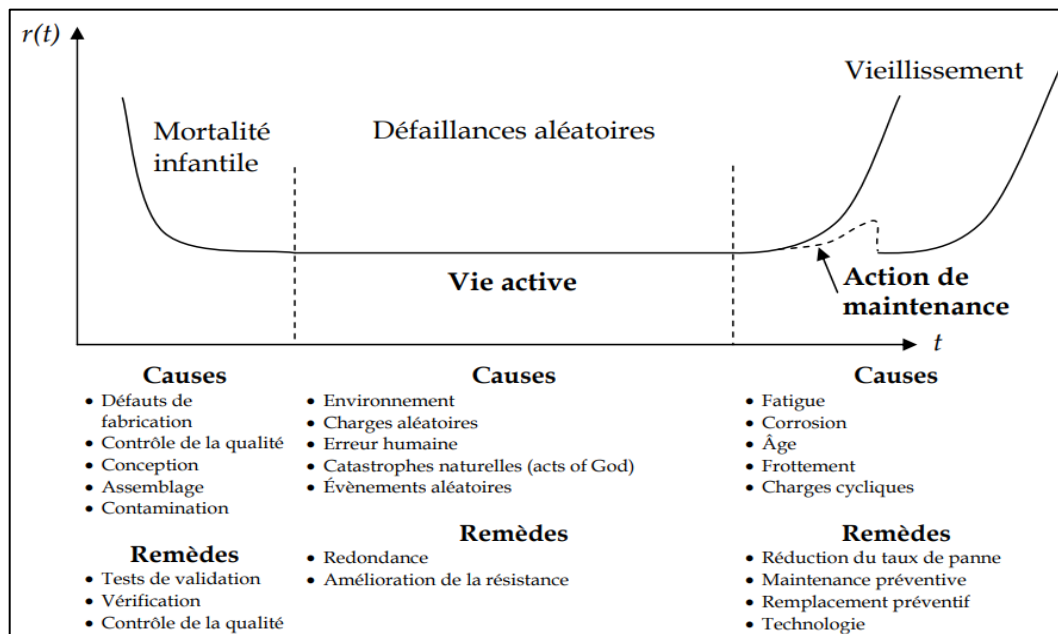


Figure 5.2 Évolution du taux de panne en courbe « baignoire »
Tirée de Menye, Jean-Baptiste (2009, p. 3)

Les causes de défaillances pendant la durée de vie active et de vieillissement sont mentionnées sur la figure 5.2 ci-dessus.

Les solutions aux défaillances et aux mortalités précoces des dispositifs mentionnées dans l'article (ZWINGMANN, 2005) sont les suivantes :

- Les tests de validation,
- La vérification,
- Le contrôle de la qualité.

Un des éléments fondamentaux qui pourrait apporter plus de crédibilité aux solutions présentées ci-dessus est la donnée de maintenance. La valorisation des données de maintenance ou des alarmes serait un moyen d'effectuer une analyse objective lors de l'application de ces solutions. Surveiller les activités des dispositifs au début de leur installation grâce à l'enregistrement des données d'alarmes mécaniques ou d'opérations permettrait d'effectuer une surveillance des habitudes d'utilisation des opérateurs sur dispositifs. Ainsi, il serait possible grâce au contrôle qualité et aux vérifications basées sur des données d'anticiper sur les erreurs d'utilisation afin de réduire le taux panne précoce.

5.4 Exemple de la valorisation des quelques données d'alarmes

La valorisation des données peut avoir plusieurs utilités, plusieurs applications et plusieurs avantages. Mettre en valeur les données permet de prendre des décisions plus objectives, qui ne sont pas simplement basées sur des interprétations.

Au début du projet de valorisation des données à la mine, nous leur avons créé un planning et donné quelques conseils sur la façon dont les données devraient être mises en valeur, ceci bien sûr en fonction de leurs demandes. Nous avons pu constater et que le contenu des rapports changeait à mesure qu'on avançait dans le projet et qu'on s'éloignait parfois de la demande initiale.

En qu'analyste ou personne qui valorise des données, un problème rencontré à la mine est qu'on produit souvent un nombre important de contenu dans les rapports qu'ils n'ont pas souvent le temps de lire.

Une des raisons pour lesquelles les rapports seront souvent amenés à évoluer au fil du temps, est qu'on doit souvent partir d'un cadre général où on produit tous les contenus demandés et suggérés pour arriver à un rapport résumé qui regroupe toutes les demandes et idées rassemblées depuis le début en peu de mots et peu de schémas comme c'était le cas à la mine.

Dans le cas de la mine eldorado Gold Québec, les données sauvegardées du projet Newtrack avaient pour dut de suivre la production du minerai et du stérile et de surveiller les habitudes d'utilisation des camions, afin d'agir en amont sur les causes des défaillances précoces des camions.

5.4.1 Valorisation des données de production

La figure 5.3 ci-dessous montre un aperçu de la configuration Power bi du projet Newtrack de la mine. Power Bi est une plateforme qui est utilisée afin de valoriser les données des activités des camions sous terre et en surface. Sur cette figure, on retrouve l'ensemble de la flotte des camions de production monitorés. Lorsqu'on a accès à la base de données qui est directement reliée à Power Bi, il est possible de modéliser soit même de propres graphiques et d'afficher les tendances qu'on souhaite.

The screenshot displays a Power BI dashboard for truck maintenance tracking. The interface includes a top navigation bar with 'File', 'Home', 'Insert', 'Modeling', 'View', and 'Help'. Below this is a ribbon with various toolbars: Clipboard, Data, Sources, Queries, Insert, Calculations, Sensitivity, and Share. The main content area is divided into 'Filters', 'Visualizations', and 'Fields'. The 'Filters' pane shows a grid of 24 truck icons, each with a unique ID (e.g., CM408, CM407, CM406, CM405, CM404, CM403, CM401, CM402, CM409, CM481, CM482, CM483, CM484, CM480, CM482, CM481, CM482, CM481, CM487, CM486, CM488). A legend on the right indicates equipment status: green for 'Equipment in use at a future point in time', yellow for 'Equipment in use within the same period (14 hours)', red for 'Equipment not in use (single operation)', and a red triangle for 'Equipment in use (single operation) (14 hours)'. The bottom of the dashboard features a 'Maintenance Dashboard' with various filters and a 'Storage Mode: DirectQuery (click to change)' indicator.

Figure 5.3 Illustration de la plateforme de suivi des camions Power bi.

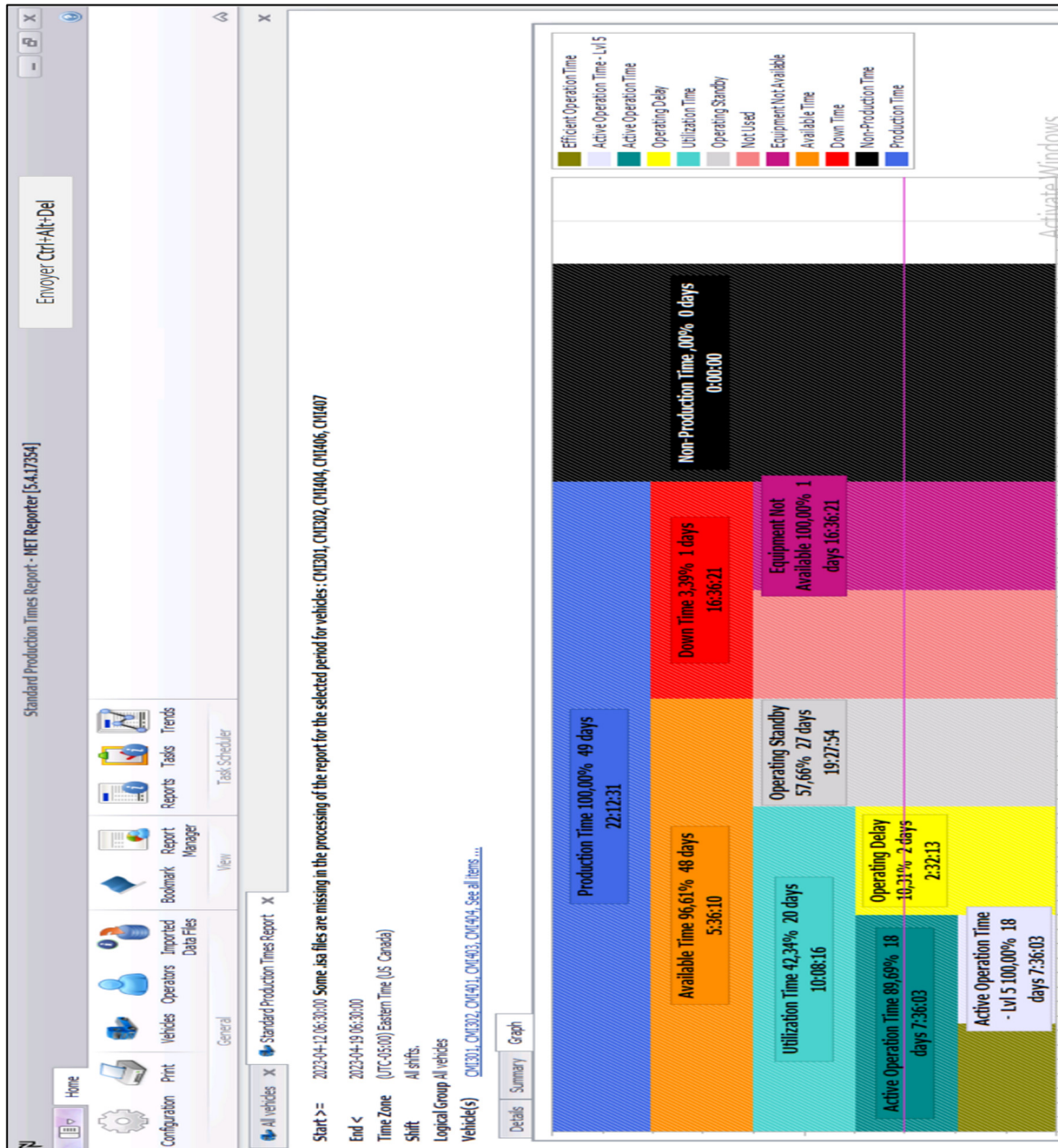


Figure 5.4 Exemple de valorisation des données de production provenant de la plateforme MET Reporter

« MET Reporter » est une autre plateforme qui est en partage de données avec Power Bi et qui permet de suivre la production à temps réel. Grâce à cette plateforme, il est possible d'avoir la répartition du temps d'utilisation des camions, de savoir si un camion est en arrêt et combien

de temps il l'a été. Ceci permet ainsi de suivre la production en temps réel et d'effectuer les ajustements nécessaires afin d'être d'atteindre les objectifs de la journée.

The screenshot displays the MET RealTime [5.4.17410] software interface. The top bar shows the keyboard shortcut 'Envoyer Ctrl+Alt+Del'. The interface is divided into several sections:

- Navigation and Tools:** Includes a map, search, and various tool icons like 'Follow Selected Vehicle', 'Print', and 'Contrast'.
- Vehicle Information:** A table listing vehicles with columns for Vehicle, State, Operator, and Route No. Vehicles CM4301 through CM4304 are shown with states ranging from 'Idle' to 'Offline'.
- Main Panel:** A large table with columns: Vehid..., Serial..., Reco..., Prog..., Last..., Mem..., Mem..., Firm..., and Online. It lists 12 vehicles (CM4301 to CM4602) with their respective memory usage and online status.
- Recorder Section:** A table with columns: Recorder, Serial No, Recorder Status, Mem Size, Mem Use, and Firmware Version. It shows data for recorder 1001788, including usage 2, 470,81 MB memory size, 1,48 MB memory use, and firmware version 10.00.237.
- Notifications:** Multiple red alarm icons with the text 'Notification for vehicle CM4301 EngRunning' are visible at the top of the interface.
- Footer:** A status bar at the bottom right indicates '(UTC-05:00) Eastern Time (US & Canada) Connected to net.tcp://ps-met-01:3002/

Figure 5.5 Visuel de déclenchement des alarmes de mauvaise utilisation des camions

« MET Analyser » est une plateforme connexe à « MET Reporter » qui permet de recevoir les notifications des alarmes des camions lorsqu'il y a de mauvaises manipulations des opérateurs ou lorsqu'il y a un problème mécanique ou d'opérations sur les camions. Elle permet aussi d'avoir la localisation sous des camions de lieu de production des alarmes afin de pouvoir intervenir rapidement si cela est nécessaire.

5.4.2 Valorisation des données des alarmes des camions

À côté de la valorisation des données de production, il est important de suivre l'état des camions afin de s'assurer qu'ils soient disponibles et opérationnels pour la production. Le but de suivre les alarmes mécaniques et opérationnelles des camions est de pouvoir agir sur les habitudes d'utilisation des camions afin de réduire les causes de la mortalité infantile (voir courbe en baignoire, figure 5.2) ou des pannes liées à l'utilisation des camions. La figure 5.5 ci-dessous nous montre un exemple de valorisation des données (provenant de MET Reporter) des activités des camions des camions en mode de fonctionnement actif. Grâce aux données de cette figure, on est capable de savoir s'il y a eu de la progression sur les alarmes d'un camion parce qu'il n'était pas en activités.

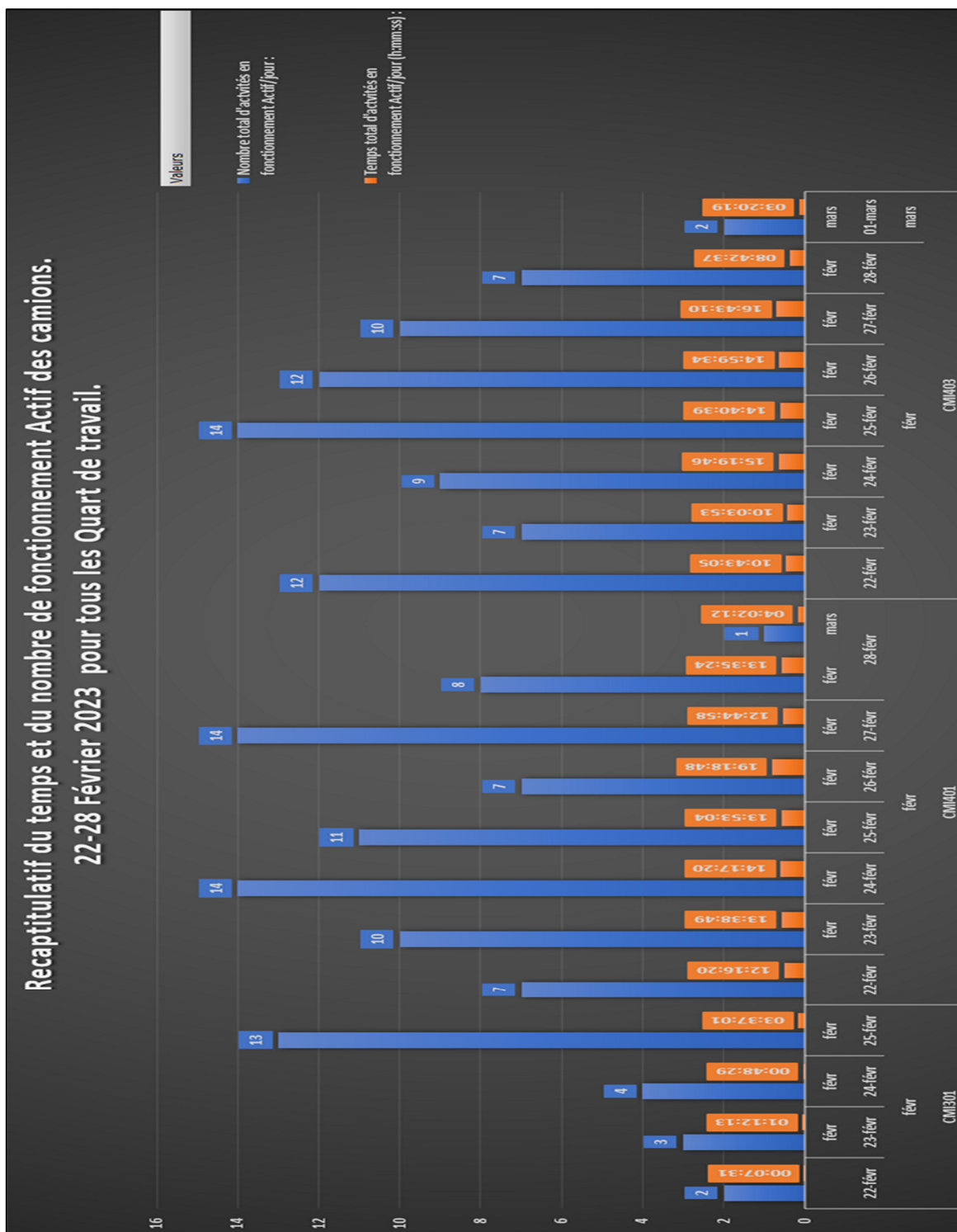


Figure 5.6 Visuel produit à partir des données exportées de « MET Reporter »

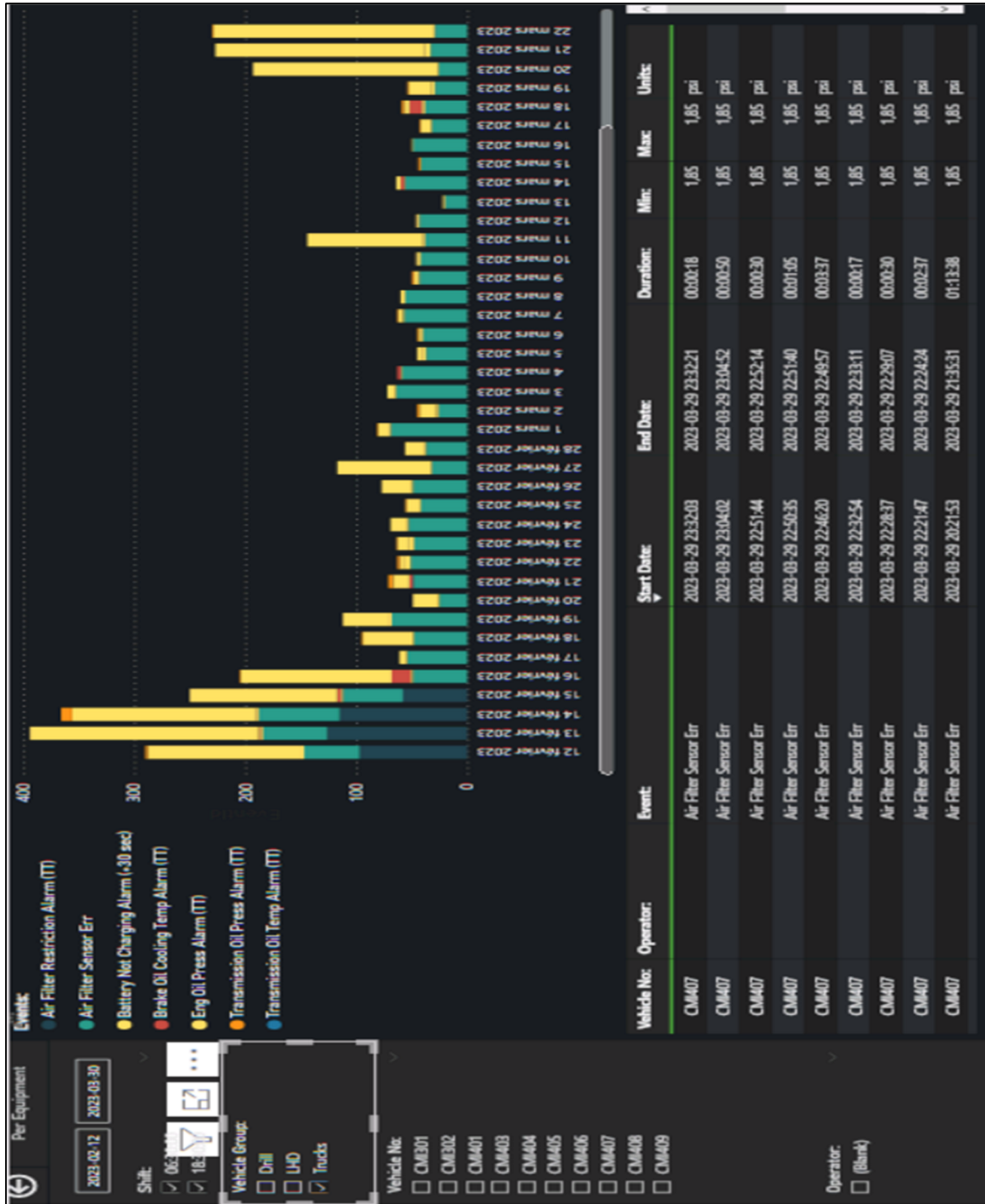


Figure 5.7 Donnée des alarmes provenant directement de la plateforme Power bi

La figure 5.6 nous présente par exemple des statistiques des alarmes des camions provenant directement de la plateforme Power bi qui est modélisée par la compagnie prestataire Sandvick qui est responsable du projet Newtrack. Les alarmes suivies sont des paramètres mécaniques et opérationnels. Les paramètres mécaniques sont reliés aux évènements qui peuvent affecter directement ou à court terme l'état mécanique des camions. Les paramètres opérationnels sont reliés des actions qui n'agissent pas directement sur la santé des camions, mais qui pourraient à long terme et après plusieurs répétitions causer des pannes.

Afin de valoriser les données et produire les rapports Newtrack des camions, nous avons exploité les captures des visuels (produits par la compagnie Sandvick) provenant directement de la plateforme Power bi et produire nos propres visuels en exploitant les données brutes exportées de Power Bi comme on peut le voir sur la figure 5.7.

EVENT NAME (MET System)	CM301	CM302	CM401	CM403	CM404	CM405	CM406	CM407	CM408	CM409	CM4501	Total	Progression
Air Filter Restriction Alarm (TI)	58		0	100.00%								58	↑
Brake Oil Cooling Temp Alarm (TI)							3	↑	20			23	↑
Coasting in Neutral Abuse (TI)							0	100.00%	0	100.00%		0	100.00%
Eng Oil Press Alarm (TI)	329		59	82.07%		27				3		359	↑
Eng Oil Temp Alarm (TI)						7	74.07%			4		70	80.50%
Hydraulic Oil Temp Alarm (TI)												0	0.00%
OverRev (TI)	0.11		0	100.00%			0	↑				0.11	↑
Overspeeding (>20km/h)						80.32	↑	28.3		22.41		131.03	27.27%
Parking Brake Driving (+3sec)	0					42.24	47.41%	10.08	64.38%	9.21		61.49	53.07%
Transmission Oil Press Alarm (TI)	0.5	100.00%								0.05		0.05	100.00%
Transmission Oil Temp Alarm (TI)												0	0.00%
Transmission Abuse Alarm	0.74		0	0.02		0.16	↑	1.54	↑	0.18		3.4	↑
Battery Not Charging Alarm (+30 sec)	0.02	97.30%	0.08	100.00%	0.26	1200.00%		0.34	77.92%	0.14	22.22%	1.04	69.41%
Week 1: Feb (15-21) 2023	Down	Equal	↑			2	↑	2	→	2		6	↑
Week 2: Feb (22-28) 2023	Decreased	Increased	↑			6	200.00%	2	0.00%	2		10	66.67%

Figure 5.8 Visuel produit à partir des données exportées de Power Bi

La figure 5.7 met en avant la progression actuelle par camion du score de chacun des évènements par rapport à la semaine précédente. Le rouge de permet de mettre en évidence le score à améliorer et bleu, les scores qui ont été améliorés par rapport a la semaine précédente. Retravailler les données pour les valoriser permet de trouver de façon de les représenter afin qu'ils soient facilement identifiables et interprétables au premier regard.

EVENT NAME (MET System)	1 - 7 Février	8 - 14 Février	15 - 21 Février	22 - 28 Février	1 - 7 Mars	8 - 14 Mars	15 - 21 Mars	22 - 28 Mars	29 Mars - 4 Avril	04-11 Avril	12-18 Avril
Air Filter Restriction Alarm (TT)	1586	876	58	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS
Brake Oil Cooling Temp Alarm (TT)	26	1	23	RAS	3	3	11	RAS	1	3	2
Coasting in Neutral Abuse (TT)	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS
Eng Oil Press Alarm (TT)	58	587	359	70	18	108	376	1203	28	60	76
Eng Oil Temp Alarm (TT)	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS
Hydraulic Oil Temp Alarm (TT)	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS
OverRev (TT)	1	1	5	24	29	35	17	22	7	35	48
Overspeeding (>20km/h)	359	340	330	159	279	600	138	225	86	211	297
Parking Brake Driving (+3sec)	RAS	RAS	1	1	RAS	RAS	4	3	RAS	RAS	RAS
Transmission Oil Press Alarm (TT)	RAS	10	RAS	RAS	RAS	2	RAS	RAS	RAS	1	RAS
Transmission Oil Temp Alarm (TT)	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS
Transmission Abuse Alarm	59	80	170	52	102	63	149	212	76	181	128
Battery Not Charging Alarm (+30 sec)	13	14	6	10	5	7	8	4	2	6	37

Figure 5.9 Évolution du score total de chacun des évènements par semaine

La figure 5.9 ci-dessus nous donne un aperçu de l'évolution de la tendance des scores au moment où nous avons commencé à produire ces rapports. On peut constater que la sensibilisation qui a été faite aux opérateurs sur la base de rapport a commencé à s'observer au niveau du score des alarmes bien qu'elles sont toujours présentes. En leur expliquant l'impact que leurs actions pourraient avoir sur la santé des camions, on peut voir que de façon globale que les durées pendant lesquelles les évènements se sont produits ont considérablement diminuée, comme c'est le cas pour l'évènement « Eng Oil Presss Alarm (TT) ». On peut aussi remarquer que la répartition du score total de production des alarmes n'est pas proportionnelle entre les camions. Considérons encore le cas de « Eng Oil Presss Alarm (TT) », pour la période du 15-21 février, on constate que la durée de cette alarme qui est de 01 heure 09 minutes et 34 s pour le quart de 6 h 30 n'a été causée que par le camion CMI401.

EVENT NAME (MET System)	15 - 21 Février	22 - 28 Février	1 - 7 Mars	8 - 14 Mars	15 - 21 Mars	22 - 28 Mars	29 Mars - 4 Avril	05 - 11 Avril	12 - 18 Avril
Air Filter Restriction Alarm (TT)	CMI401: 46m et 10s 46m et 10s	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS
Brake Oil Cooling Temp Alarm (TT)	RAS	RAS	CMI407: 05m et 21s	CMI406: 06m et 01s	CMI405: 20m et 22s	RAS	CMI409: 23s	CMI301: 19s	RAS
Coasting in Neutral Abuse (TT)	RAS	RAS	05m et 21s	06m et 01s	20m et 22s	RAS	23s	19s	RAS
Eng Oil Press Alarm (TT)	CMI401: 1h 09m et 34s 01h 09m et 34s	CMI401: 02m et 15s 02m et 15s	CMI409: 30m et 45s 31m et 16s	CMI405: 01h 21m et 22s 01h 23m et 46s	CMI401: 55m et 20s 01h 26m et 15s	CMI401: 03h 04m et 24s 06h 26m et 17s	CMI302: 49s	CMI302: 4m et 55s 08m et 15s	CMI302: 08m et 13s 11m et 47s
Eng Oil Temp Alarm (TT)	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS
Hydraulic Oil Temp Alarm (TT)	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS
OverRev (TT)	CMI401: 18s 18s	CMI406: 45s 45s	CMI406: 09s 21s	CMI406: 35s 55s	CMI406: 12s 14s	CMI406: 57s 57s	CMI407: 07s 10s	CMI407: 06s 12s	CMI403: 18s 36s
Overspeeding (>20km/h)	CMI405: 42m et 31s 01h 09m et 58s	CMI405: 25m et 56s 42min et 11s	CMI405: 19m et 56s 33m et 26s	CMI407: 35m et 02s 38m et 57s	CMI406: 02m et 41s 03m et 35s	CMI405: 19m et 49s 20m et 12s	CMI406: 3m et 30s 03m et 30s	CMI405: 44m et 22s 01h 03m et 33s	CMI406: 17m et 30s 40m et 17s
Parking Brake Driving (+3sec)	CMI409: 03s 03s	CMI301: 30s 30s	RAS	RAS	RAS	CMI403: 38s 01m et 05s	CMI403: 01m et 05s	RAS	RAS
Transmission Oil Press Alarm (TT)	RAS	RAS	RAS	CMI406: 58s 58s	RAS	RAS	RAS	CMI404: 04s 04s	RAS
Transmission Oil Temp Alarm (TT)	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS
Transmission Abuse Alarm	CMI406: 01m et 29s 09m et 36s	CMI403: 13s 26s	CMI301: 05s 06s	CMI409: 23s 34s	CMI409: 23s 36s	CMI406: 02m et 58s 04m et 05s	CMI406: 14s 31s	CMI302: 14s 46s	CMI406: 24s 01m et 23s
Battery Not Charging Alarm (+30 sec)	CMI406: 30s 01m	CMI406: 30s 01m	CMI405: 01m 01m et 30s	CMI405: 01m et 30s 02m	CMI406: 30s 30s	CMI405: 30s 30s	CMI405: 30s 30s	CMI406: 01m 02m	CMI404: 09m et 35s 09m et 35s
Occurrence avec le temps Max	Quart de 6h30								
Durée Totale des Occurrences									

Figure 5.10 Mise en évidence de la tendance et de la répartition du score des types d'évènement.

Le tableau 5.3 de valorisation de données suivant nous donne un aperçu de l'évolution hebdomadaire du nombre de types d'évènements survenus par camion. Il permet aussi grâce à un simple coup d'œil de savoir si on observe une diminution du nombre de types d'évènements

parce que le camion était absent, retiré ou parce qu'il y a réellement eu une amélioration de la part des opérateurs. Il permet aussi grâce à un simple coup d'œil de savoir des alarmes mécaniques versus celle des alarmes opérationnelles.

Tableau 5.3 Mise en évidence de la tendance d'évolution hebdomadaire du nombre de types d'évènements par camion.

	Nombre total de types d'Alarmes (1-7 février)	Nombre total de types d'Alarmes (8-14 février)	Nombre total de types d'Alarmes (15-21 février)	Nombre total de types d'Alarmes (22-28 février)
CMI 301	2 - OverRev (TT) (Mécanique) - Transmission Abuse Alarm (opérationnel)	0	1 - Transmission Abuse Alarm	2 - Parking Brake Driving (+3sec) - Transmission Abuse Alarm
CMI302	1 -Eng Oil Press Alarm (TT)	2 -Eng Oil Press Alarm (TT) -Overspeeding (>20 km/h)	2 -Eng Oil Press Alarm (TT) -Overspeeding (>20 km/h)	0
CMI401	3 - Air Filter Restriction Alarm (TT) -Eng Oil Press Alarm (TT) - Transmission Abuse Alarm	4 - Air Filter Restriction Alarm (TT) -Brake Oil Cooling Temp (TT) -Eng Oil Press Alarm (TT) - OverRev (TT)	4 - Air Filter Restriction Alarm (TT) -Brake Oil Cooling Temp (TT) -Eng Press Temp Alarm (TT) - OverRev (TT)	2 -Eng Oil Press Alarm (TT) - Transmission Abuse Alarm
CMI403	1 - Transmis sion Abuse Alarm	0	1 - Transmissi on Abuse Alarm	1 - Transmissi on Abuse Alarm
CMI404	2 -Overspeeding (>20 km/h) - Transmis sion Abuse Alarm	3 -Transmission Oil Press Alarm (TT) -Battery Not Charging Alarm (+30sec) - Transmission Abuse Alarm -Overspeeding (>20 km/h)	3 -Transmission Oil Press Alarm (TT) -Battery Not Charging Alarm (+30sec) -Overspeeding (>20 km/h)	0
Bleu =Alarmes mécaniques Jaune =Alarmes Opérationnelles				

	Nombre total de types d'Alarmes (1-7 février)	Nombre total de types d'Alarmes (8-14 février)	Nombre total de types d'Alarmes (15-21 février)	Nombre total de types d'Alarmes (22-28 février)
CMI405	0	3 -Eng Oil Press Alarm (TT) -Battery Not Charging Alarm (+30sec) -Overspeeding (>20 km/h)	4 -Eng Oil Press Alarm (TT) -Battery Not Charging Alarm (+30sec) -Overspeeding (>20 km/h) - Transmission Abuse Alarm	4 -Eng Oil Press Alarm (TT) -Battery Not Charging Alarm (+30sec) -Overspeeding (>20 km/h) - Transmission Abuse Alarm
CMI406	0	1 -Overspeeding (>20 km/h)	4 -Brake Oil Cooling Temp (TT) -Battery Not Charging Alarm (+30sec) -Overspeeding (>20 km/h) - Transmission Abuse Alarm	4 - OverRev (TT) -Battery Not Charging Alarm (+30sec) -Overspeeding (>20 km/h) - Transmission Abuse Alarm
CMI407	3 -Brake Oil Cooling Temp (TT) -Overspeeding (>20 km/h) - Transmission Abuse Alarm	1 -Brake Oil Cooling Temp (TT) -Overspeeding (>20 km/h) - Transmission Abuse Alarm	4 -Brake Oil Cooling Temp (TT) -Battery Not Charging Alarm (+30sec) -Overspeeding (>20 km/h) - Transmission Abuse Alarm	3 -Battery Not Charging Alarm (+30sec) -Overspeeding (>20 km/h) - Transmission Abuse Alarm
CMI408	0	0	0	0
CMI409	1 - Transmission Abuse Alarm	2 -Eng Oil Press Alarm (TT) -Battery Not Charging Alarm (+30sec)	4 -Eng Oil Press Alarm (TT) - Parking Brake Driving (+3sec) -Battery Not Charging Alarm (+30sec) - Transmission Abuse Alarm	2 -Eng Oil Press Alarm (TT) - Transmission Abuse Alarm
CMI501	0	0	0	0
Bleu =Alarmes mécaniques Jaune =Alarmes Opérationnelles				

La valorisation des données est une notion qui prend tout son sens dans un processus de création d'un modèle de maintenance 4.0. Elle peut être considérée comme un début de maintenance 4.0, car même on n'obtient pas les informations issues de l'exploitation des données à temps réel, on peut quand on a analysé ses données en différences et opérer des ajustements conséquents. Comme dans le cas de la mine Eldorado Gold Québec, nous avons vu la valorisation des données passe par réévaluation continue de l'information tirée des données afin d'arriver à des résultats simples, résumés et faciles à observer. Si la quantité d'informations tirées des données est trop importante et difficile à interpréter, les principaux utilisateurs auront du mal à les exploiter et les efforts fournis afin de pouvoir les exploiter seront en vain.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Nous avons évoqué dans les études préliminaires à effectuer avant d'implanter un modèle de maintenance 4.0 dans une organisation, les questions qu'on pourrait se poser après cette étape seraient de savoir comment mettre en place un modèle de maintenance 4.0 et quelles seraient ses atouts. Pour répondre à cette question, nous avons proposé un plan de connexion de la maintenance 4.0 pour les deux cas pratiques de notre mémoire. Nous avons aussi listé les avantages et les inconvénients d'avoir un modèle prévisionnel pour le cas de l'hôpital et nous avons effectué une analyse économique afin d'évaluer l'impact financier de ce modèle de fonctionnement à l'hôpital.

6.1 Recommandations pour le plan d'implémentation du modèle de maintenance 4.0 à la station d'épuration des eaux usées de Montréal

L'amélioration de la maintenance des modules 645-001 et 656-001 pour la faire migrer vers la maintenance 4.0 en utilisant l'Internet des objets était notre mission à la station d'épuration des eaux usées de Montréal ; mais à cause du contexte de Covid-19, nous n'avons pas pu effectuer une analyse complète de ces modules afin de pouvoir leur proposer des méthodes d'algorithmes pour le traitement de données et une feuille de route pour la réalisation du projet. Malgré le fait que nous n'avons pas pu leur rendre un rapport complet d'étude de projet, nous avons quand même pu leur proposer des pistes et des recommandations grâce aux échanges qui ont eu lieu pendant les visites. Les recommandations suivantes ont été faites en s'appuyant sur la revue de littérature des pratiques de maintenance et sur les indications pour la transition vers un modèle de maintenance 4.0 du livre de Acatech. Grâce à ces éléments, nous leur avons fait des suggestions à propos des éléments par lesquels ils pourront commencer leur étude pour la mise en place de leur modèle de maintenance 4.0. Les propositions et les recommandations peuvent être regroupées en points suivants :

A. Effectuer des tournées d'inspection des sections concernées, plusieurs fois s'il faut pour revalider les informations recueillies et s'assurer que le projet sera en harmonie avec les attentes et les besoins des utilisateurs.

B. Lister le matériel réutilisable dans la migration vers le 4.0

Effectuer un inventaire de tout ce qui existe comme matériel dans les sections concernées pour évaluer ceux qui seront conservés, ceux qui seront modifiés et ceux qui seront éliminés dans la nouvelle configuration.

C. Effectuer une synthèse et un récapitulatif des processus déjà existants

Revalider lors des visites plusieurs fois s'il le faut les différents processus de maintenance opérationnels. Il faudrait lors des échanges qui auront lieu pendant les visites valider avec les utilisateurs, les gestionnaires et les décideurs des pratiques qu'ils souhaitent conserver, modifier ou supprimer.

D. Identifier les sources de perte de temps, d'argent, d'efficacité et même de perte de ressources dans le processus de maintenance.

Parmi les différents processus de maintenance existants, il serait nécessaire d'évaluer ceux qui sont une source de perte de temps, d'argent, ou des ressources et les supprimer ou les modifier pour les rendre plus efficaces s'il est nécessaire de les conserver.

E. Savoir en avance les personnes qui prendront les décisions dans le domaine de la maintenance et dans le cadre d'avancement du projet.

Il est important dans ce type de projet d'identifier les principaux décideurs afin de se rassurer que les livrables soient en accord avec leur cahier des charges.

F. Une analyse de maturité numérique de chacune des sections à améliorer.

L'analyse de la maturité numérique des secteurs concernés permettrait d'évaluer la possibilité de modifier les équipements de ces secteurs grâce à l'internet des objets et aux capteurs intelligents. Elle permettrait aussi de comparer le niveau d'avancée technologique des outils et des équipements des secteurs concernés avec les technologies existant sur le marché, afin de choisir celles qui seront les plus innovantes et avantageuses.

G. Une synthèse des données des archives papier pour les intégrer dans le nouveau système de données.

Il est important de vérifier que les données présentes dans les archivages papier soient utiles et exploitables. Si elles sont exploitables, il va falloir décider avec les utilisateurs et les décideurs, lesquels seront gardés et sous quelle forme elles seront réutilisées. Il serait aussi important de vérifier que ces données soient compatibles avec le nouveau système.

H. Planifier l'IOT des équipements et des outils d'information n'ayant pas d'archivage numérique.

Les informations pertinentes récupérées au niveau de l'archivage papier, nous permettrions de sélectionner les appareils qui retournent des données pertinentes et de planifier leur évaluation grâce à l'internet des objets afin qu'ils puissent produire et transmettre automatiquement des données numériques, dans les cas où il serait possible de les améliorer.

I. Explorer certaines des infrastructures déjà en place pour décider si elles seront utiles et en lien avec le projet de maintenance 4.0.

Parmi les appareils recensés pendant l'inventaire, il sera important de choisir ceux qui seront réutilisés dans le nouveau système. Notre rôle en tant que consultant dans le projet de transformation numérique des modules sélectionnés sera d'agir aussi en tant que conseiller pour les aider à valider les appareils qui pourront et qui devront être intégrés dans la nouvelle configuration tout en étant en adéquation avec elle.

J. Inclure les projets d'améliorations ou de relocalisation des infrastructures matérielles et logicielles déjà en cours.

Pendant les phases d'évaluation du projet de transformation numérique et de maintenance 4.0, il serait important de considérer tous les autres projets en cours différents du nôtre, mais qui sont connectés avec le nôtre et les inclure dans notre analyse et dans la planification globale.

F. Inclure plusieurs formats dans les types de données qui devront être gérées par le système de maintenance 4.0.

Le stockage des données est l'une des étapes les plus importantes dans un projet de transformation numérique ou de maintenance 4.0 et serait judicieux de concevoir et de mettre sur pied un système qui inclurait plusieurs types de données afin de pouvoir diversifier leurs différentes méthodes d'acquisitions et de faciliter leurs acquisitions et leurs interprétations.

G. Fusion ou Communication entre PI et Maximo.

PI et Maximo sont deux outils d'aides à la gestion de la maintenance qui sont présentement utilisés séparément, mais qui servent tous les deux comme base de données et outils d'aide à la maintenance. Le fait de multiplier les ressources d'aide à la maintenance pourrait augmenter les erreurs et la corruption des données ; donc il serait conseillé dans le nouveau système de fusionner PI et Maximo en seul outil d'aide à la maintenance ou de concevoir une interface pour chacune des applications tout en les faisant converger vers une base de données unique.

H. Garder la collecte visuelle des données

Il serait toujours important de pouvoir garder le processus de collecte manuelle des données comme méthode alternative temporaire en cas de dysfonctionnement du nouveau système automatique de collecte des données ou dans le cas où il serait impossible d'automatiser la collecte des données.

I. Mettre en place un système de validation d'informations (données) et de procédures de maintenance.

Les données possèdent des informations clés dans un projet de transformation numérique ou de maintenance 4.0 ; c'est pour cette raison qu'il serait important de mettre en place un système de validation de toutes les données qui seront exploitées pour la maintenance afin de s'assurer qu'elles retournent les bonnes informations et qu'elles contiennent le moins d'erreurs possible. Ceci justifie l'importance de valider par exemple des procédures de maintenance et de s'assurer que les bonnes étapes sont suivies, car, ces informations pourraient être analysées plus tard pour anticiper les prochaines pannes.

Il serait conseillé de prendre en considération toutes les recommandations faites ci-dessus pendant les études de faisabilité et les phases théoriques du projet. L'écosystème dans lequel devrait être déployé les nouvelles solutions et le nouveau système de maintenance 4.0 est un aspect qui correspondrait aussi important. Cet écosystème pourrait être constitué des bâtiments, des infrastructures matérielles et logiciels, de la facilité d'accès aux informations et aux ressources, de la facilité d'accès aux nouveaux équipements ou aux nouvelles technologies qu'on souhaiterait acquérir et de la façon dont le projet est perçu et sera accueilli par les employés et les gestionnaires. Le budget total alloué pour le projet reste aussi un facteur important avec lequel il va falloir composer pour trouver le juste milieu en considérant toutes les informations présentées ci-dessus et notre rôle en tant que consultant sera de les aider à trouver ce juste milieu.

6.2 Plan de mise en connexion du modèle de maintenance 4.0 : cas de l'hôpital Honoré-Mercier

La bonne gestion d'une maintenance pourrait commencer par l'élaboration d'un bon principe de fonctionnement. Définition du modèle de maintenance biomédicale d'un hôpital qui pourrait exercer une influence sur les subdivisions entre la maintenance gérée à l'interne et celle gérée par les compagnies de prestation externes. Cette organisation de la maintenance aura une incidence aussi sur les contrats de maintenance et les équipements à mettre sous contrat de service. Les remarques et suggestions que nous pouvons retenir des propositions faites pour améliorer le fonctionnement de la maintenance interne et externe à l'hôpital Honoré-Mercier sont les suivantes :

- Mettre en place un système qui permettrait aux techniciens d'effectuer du temps supplémentaire en télétravail pour effectuer des recherches et consulter de la documentation technique. Ceci leur permettrait de consacrer plus de temps aux interventions lorsqu'ils seront à l'hôpital.
- Échanger au sujet des nouveaux principes de maintenance élaborés avec les responsables des différents départements pour s'assurer que les nouvelles pratiques soient appliquées et qu'elles répondent à leurs besoins. Essayer d'adapter les principes de fonctionnement de la maintenance en fonction de chaque département peut parfois être plus efficace.
- La maintenance externe ne devrait pas seulement reposer sur les compagnies prestataires, elle devrait être partagée avec le service interne de l'hôpital pour des raisons économiques et pour que le service de maintenance soit plus efficace.
- Accorder une attention particulière à la formation et au recyclage des techniciens sur les équipements médicaux pour effectuer une bonne veille technologique et pour offrir plus de service en interne.
- Effectuer une sorte de rotation des compétences entre les techniciens en permutant de temps en temps l'attribution de la responsabilité des départements pour s'assurer de la continuité des services en cas d'absence ou de remplacement d'un technicien.
- Permettre aux techniciens de pouvoir avoir un accès à distance sur certains équipements afin de réduire le temps de réparation et aussi d'intervenir rapidement pendant les périodes de garde si le problème peut être réglé à distance.

Une autre remarque qu'on pourrait effectuer concernant les agents administratifs est qu'ils sont censés assister les techniciens biomédicaux dans l'exercice de leurs tâches, mais n'ont aucune expérience en génie biomédical ; ce qui influence les opérations suivantes :

- i. Le suivi des prestations : ils peuvent être parfois déconnectés de la réalité, par exemple du fait qu'il est important de renouveler les contrats de service à temps pour que cela n'entraîne pas des retards ou des arrêts de service.**
- ii. La maîtrise exacte des points essentiels à négocier dans les termes des contrats de service.**
- iii. La création des requêtes d'alerte : ils peuvent avoir une interprétation biaisée à cause du manque de connaissance en génie biomédical et mal traduire les problèmes décrits par manufacturiers.**
- iv. La rédaction des comptes rendus de maintenance : les informations peuvent être altérées lorsqu'elles sont transmises d'une personne à une autre ou mal interprétées à cause du manque de connaissance et des termes techniques des agents administratifs.**
- v. Les techniciens doivent être consultés pendant la rédaction des termes des contrats de service, tout simplement parce qu'ils sont plus proches du personnel médical pour savoir qu'elles sont leurs demandes et besoins en ce qui concerne les services fournis par le GBM.**

6.2.1 Vigie technologique de la maintenance interne et externe

Effectuer la vigie technologique de la maintenance biomédicale de l'hôpital Honoré-Mercier nous a permis d'observer et d'explorer les pratiques et les procédures de maintenance, le protocole des prestations de service, l'organisation et le fonctionnement de l'atelier de maintenance, la gestion des pièces de rechange, les technologies et les versions du matériel biomédical et de maintenance. L'objectif était de comparer les pratiques et les technologies de l'hôpital Honoré-Mercier avec celles des autres hôpitaux ou celles existantes sur le marché. Nous n'avons pas pu nous focaliser sur la veille technologique des équipements biomédicaux à cause de leur nombre très important et des difficultés à parfois les localiser ou les avoir disponibles. Les points importants à retenir de cette vigie technologique sont les suivants :

- Le déménagement de l'atelier aura lieu bientôt et il faudrait le prendre en considération dans les projets de réorganisation et de migration de la maintenance vers le 4.0.
- Il faudrait effectuer un inventaire des appareils médicaux n'ayant pas d'archivage numérique et vérifier s'il serait possible de les modifier afin de pouvoir en extraire plus tard des données numériques qui serviront à rendre leur maintenance plus intelligente.
- Il faudrait mettre en place une meilleure organisation des prestations de maintenance interne et externe. Il serait par exemple possible d'intégrer leur gestion dans le logiciel GMAO afin de pouvoir les mentionner de façon automatique, quand elles auront lieu et lorsqu'elles seront en cours d'exécution ; ceci nous permettrait aussi de mieux organiser la gestion des employés.
- Il faudrait intégrer certaines fonctionnalités des autres logiciels dans Octopus pour économiser du temps pendant les procédures de maintenance préventive.
- Il faudrait penser à réorganiser l'atelier de maintenance, car un mauvais rangement ou une mauvaise organisation de l'atelier pourrait causer une perte de temps à rechercher des éléments et donc une perte d'argent.
- Il faudrait prévoir la reconfiguration du fonctionnement du département et de la disposition des pièces et du matériel de maintenance si nécessaire pour optimiser les opérations de maintenance.

Une nouvelle solution du logiciel GMAO (Octopus) est en train d'être mise en place et une des suggestions que nous pouvons faire par rapport à cette nouvelle application serait de réviser les protocoles de maintenance et se rassurer que les nouvelles procédures mises en place soient déjà effectives, testées et approuvées par les utilisateurs avant de les intégrer et de les déployer définitivement dans la solution.

6.2.2 Discussion sur les solutions qui pourront améliorer la maintenance

Plusieurs projets tels que le renouvellement de l'application Octopus, le déménagement du département et le renouvellement des équipements biomédicaux sont en cours pour améliorer la maintenance biomédicale et les services médicaux. Nous avons l'habitude de nous réunir au moins une fois par mois pour discuter individuellement de l'avancement de ces multiples projets ; mais une des remarques que nous pouvons faire par rapport à ces projets serait qu'ils ne sont pas mis sur pied en tenant compte des évolutions technologiques ou en anticipant la migration vers une maintenance 4.0 qui serait pourtant bénéfique pour l'hôpital.

Le nouvel Octopus qui est en cours de réalisation fait partir d'une des recommandations faites pour améliorer le système de GMAO et les opérations de maintenance ; mais il est développé sans avoir pensé et testé au préalable les nouvelles procédures de maintenance pour se s'assurer qu'elles soient efficaces avant de les implémenter. Réviser les pratiques de maintenance permet aussi d'évaluer celles qui doivent être changées et celles qui sont toujours efficaces pour rester et être implémentées dans le nouvel Octopus.

Selon les annonces faites par le superviseur, le nouvel Octopus sera bientôt déployé, mais une des critiques dans leur façon de procéder est qu'il compte déployer la nouvelle application sans l'avoir fait tester par les techniciens qui sont les principaux utilisateurs, mais l'application a plutôt été testée par le chef de service et agents administratifs qui a des taches complètement différentes de celles des techniciens.

La centralisation de toutes les données et informations utilisées pour la maintenance devrait être prise en considération dans la nouvelle application pour éviter de multiplier les destinations de stockages et pour les rendre facilement accessibles par les autres techniciens. Ceci permettrait de réduire le temps de recherche des informations utiles pour la maintenance ; mais il faudrait aussi quand même mettre sur pied une procédure de vérification et de validation de ces informations afin de se rassurer qu'elles soient exploitables plus tard.

En plus de la centralisation des données, il serait aussi intéressant d'automatiser certains processus dans la nouvelle application afin d'économiser du temps. La gestion et la recherche des pièces de rechange seraient par exemple un des processus qui pourrait être automatisé et qui permettrait plus tard grâce aux données collectées d'effectuer des analyses financières et des prévisions de commandes. Intégrer les manuels de service dans le nouvel Octopus et automatiser la recherche et la navigation dans ces manuels serait une autre pratique qui permettrait de sauver du temps si elle était automatisée.

Même si automatiser certaines pratiques de maintenance était la solution pour faire des économies financières et de temps, il y a en revanche des pratiques manuelles qui valent la peine d'être conservées comme les tournées d'inspection en personne qui permettraient d'avoir un visuel sur l'état physique de chaque équipement.

6.2.3 Discussion sur la maturité numérique, la capacité numérique

La maturité numérique des installations et d'un environnement industriel fait partir des éléments à analyser en priorité lorsqu'on est dans un projet de transformation numérique ou de maintenance 4.0 pour avoir une vue d'ensemble sur comment la transition devrait se faire.

Celle de la maintenance biomédicale que nous avons évaluée dans le chapitre 4 nous a révélé que son niveau de maturité serait situé de façon globale entre le niveau 1 (débutant) et le niveau 3 (moyen). Mais si nous nous appuyons sur le niveau de maturité affecté à chaque élément, nous pouvons dire qu'elle se situe entre le niveau 1 (débutant) effectué à 5 éléments et le niveau 2 (faible) affecté à 4 éléments. Si on voulait considérer plutôt l'option d'attribuer à une organisation, le niveau de maturité égal à celui ayant le plus grand nombre d'éléments en affectations, nous dirons plutôt que la maintenance biomédicale de l'hôpital possède une maturité de niveau 1 étant donné qu'il possède 5 éléments en affectation. Pour être en mesure d'implémenter un modèle de maintenance 4.0 dans certains cas de figure, il serait nécessaire de faire évoluer le niveau de maturité des éléments (culture, valeurs partagées, stratégies, décisions, ressources, etc.) principaux de façon globale individuels. Il est aussi important de réaliser qu'en agissant sur le niveau de maturité d'un élément, cela pourrait indirectement avoir

sur d'autres éléments d'où le schéma d'interrelation que nous avons réalisé au chapitre 2 pour mettre en avant ces relations mutuelles.

En observation, la capacité et la maturité numérique de la maintenance biomédicale de cet hôpital, nous avons pu identifier cinq principaux facteurs qui pourraient permettre de les faire évoluer, à savoir :

- L'artisanat qui permet d'évaluer les technologies des installations et décider si elles seront adéquates pour le projet ou si elles doivent être mises à jour,
- La discipline qui permet d'évaluer la fréquence d'utilisation des infrastructures (matériels et logiciels) déjà en place pour accomplir les tâches quotidiennes,
- L'intégrité qui permet d'évaluer si toutes les données sont centralisées et facilement accessibles,
- La prédictivité qui permet d'évaluer la capacité des installations à prévoir un dysfonctionnement avant qu'il ne se produise,
- L'autonomie qui permet d'évaluer la capacité d'un système à détecter de façon autonome des dysfonctionnements.

En considérant ces 5 facteurs, le seul point qu'on pourrait en partie attribuer au modèle de fonctionnement actuel de la maintenance biomédicale à Honoré-Mercier serait la discipline ; mais en ce qui concerne les points, presque tout serait à refaire.

Il n'existe pas un seul modèle d'évaluation numérique et c'est un concept dont le schéma peut changer en fonction des projets, mais ils concourent tous vers le même objectif qui est celui de détecter les défaillances d'un système et de les améliorer.

6.2.4 Discussion sur l'intégration des algorithmes de traitement de données dans la maintenance et choix de la configuration GMAO.

Les algorithmes de traitement de données de maintenance sont des outils qui sont censés se servir des données recueillies directement sur des équipements ou provenant de la base de données du système GMAO pour prévoir et anticiper des événements futurs. L'idéal dans notre cas de figure serait d'être informé sur l'état des équipements, mais aussi d'autres facteurs de

maintenance à temps réel. Notre proposition pour faire améliorer le modèle de maintenance biomédical avec des algorithmes intelligents, serait de développer le logiciel de traitement de données et son interface séparément de l'application GMAO (Octopus), mais de faire communiquer les deux applications vers la même base de données. De cette façon on aurait une seule application qui pourrait servir uniquement à analyser des données du système GMAO pour produit des analyser financières, de gestion des stocks, de risques, des paramètres indicatifs des équipements médicaux et autres à temps réel. La figure 5.1 nous donne un aperçu de la proposition du modèle de communication entre l'application GMAO et les algorithmes intelligents de traitement de données.

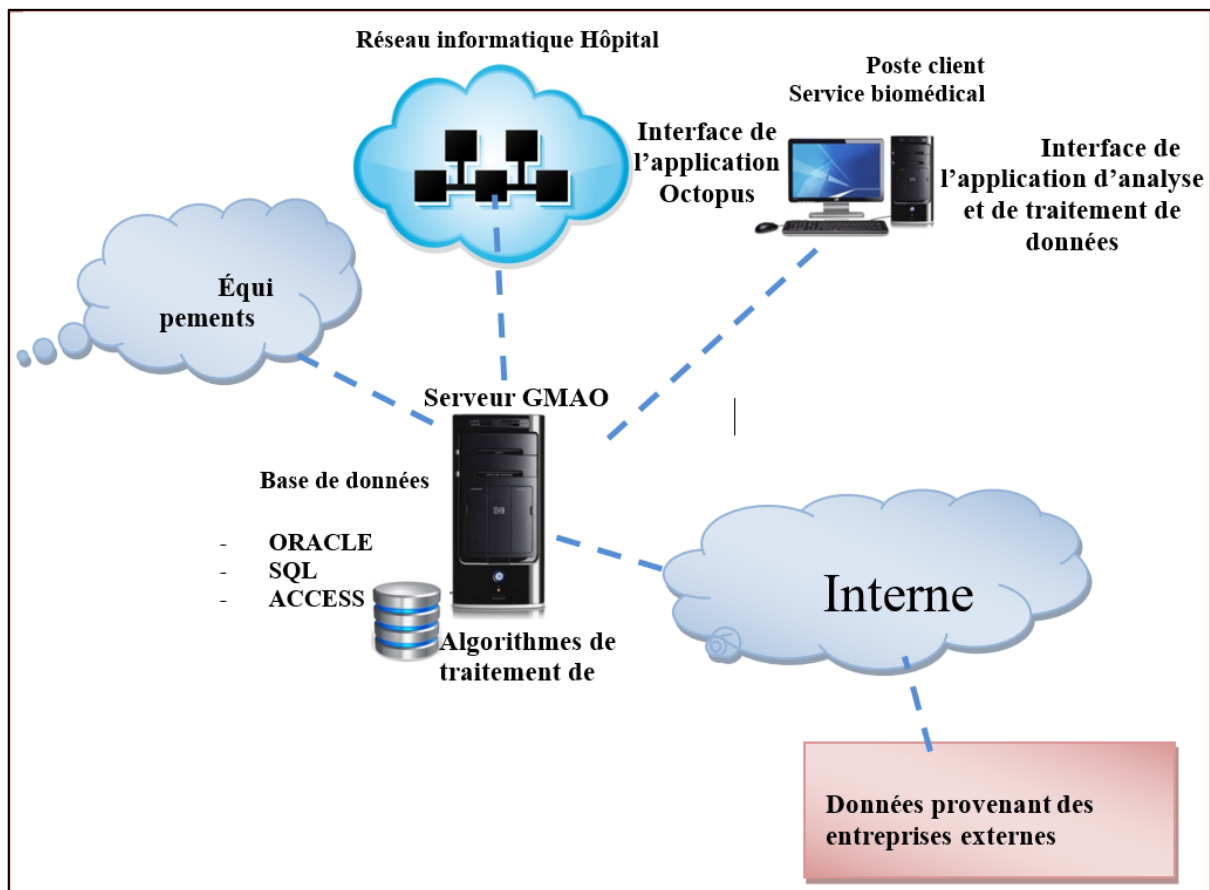


Figure 6.1 Proposition d'un modèle de communication entre les algorithmes intelligents de traitement de données et le système GMAO.

Les points importants sur lesquels on pourrait se focaliser au moment du développement de l'application de traitement des données sont les suivants :

Point 1 : Inclure dès le début du projet les prestataires qui de près ou de loin seraient associés à la maintenance biomédicale de l'hôpital. Il serait important d'effectuer un audit au prët des compagnies prestataires de maintenance biomédicale de l'hôpital pour recenser les logiciels qui vont devoir être connectés ou échanger avec la base de données ou d'autres logiciels de maintenance de l'hôpital. L'objectif de cette démarche serait d'évaluer la compatibilité entre ces logiciels et ceux qui seront installés plus tard dans la nouvelle configuration de l'hôpital ; ce qui pourrait permettre d'installer les versions de logiciels compatibles et les outils nécessaires pour que les transferts de données et les communications avec leurs applications puissent se faire facilement.

Point 2 : Se référer aux bonnes personnes pour tester le fonctionnement et l'utilité des nouvelles applications. Le nouvel Octopus qui sera bientôt déployé à Honoré-Mercier a été jusqu'ici uniquement testé par le chef de service et les agents administratifs qui ne sont pas les principaux utilisateurs. L'avantage de faire tester les applications par les bons utilisateurs permettrait d'avoir des retours ciblés, efficaces, efficients et ferait économiser du temps de développement.

Point 3 : Choisir une bonne architecture GMAO qui permettrait d'avoir un bon socle sur lequel reposeraient les logiciels et les applications d'aides à la gestion de la maintenance. Choisir la mauvaise architecture GMAO pour système de maintenance biomédical pourrait exercer une influence sur le trafic des données, la rapidité et la fluidité de communication.

Plusieurs architectures sont possibles pour le déploiement d'une solution de GMAO au sein du service biomédical de l'hôpital. Il est présenté de façon synthétique ci-après trois types d'architectures envisageables. Un audit dans le cadre de la conduite du projet permettra de retenir l'architecture la mieux adaptée.

i. L'Architecture locale, client/serveur.

L'application est installée sur chaque poste client local. L'ensemble des bases de données de GMAO se trouve dans un serveur local. Un accès sans restriction est possible sur le site de l'hôpital, avec une supervision des droits d'accès selon les profils utilisateurs. Des restrictions sont effectuées sur le nombre de postes clients qu'il sera possible de connecter simultanément (figure 6.2).

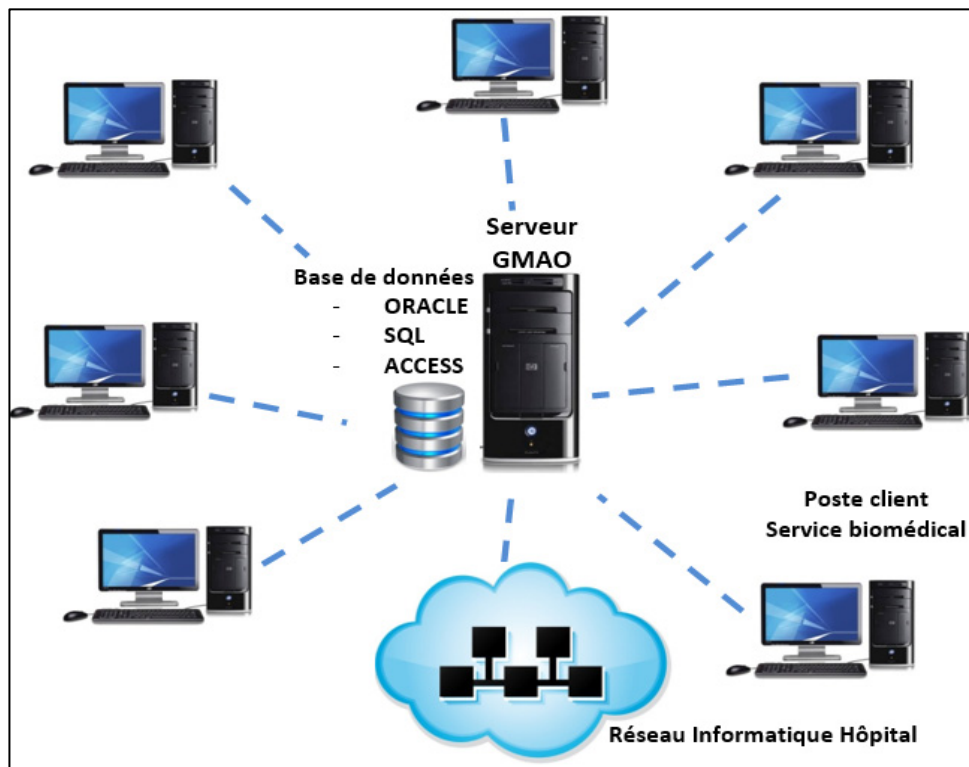


Figure 6.2 Architecture GMAO locale client/serveur

ii. L'Architecture WEB

Aucune application n'est installée sur les postes clients. Les données sont hébergées dans des serveurs distants, l'accès au système peut s'effectuer à travers des terminaux de différente nature. Cette solution a l'avantage de favoriser un accès géographique et un accès temporel sans restriction, une maintenance à distance plus simple, mais pas toujours plus efficace. Son inconvénient réside dans le fait de ne plus disposer de la maîtrise des données. Cette architecture nécessite également un accès internet haut débit permanent (Figure 6.3).

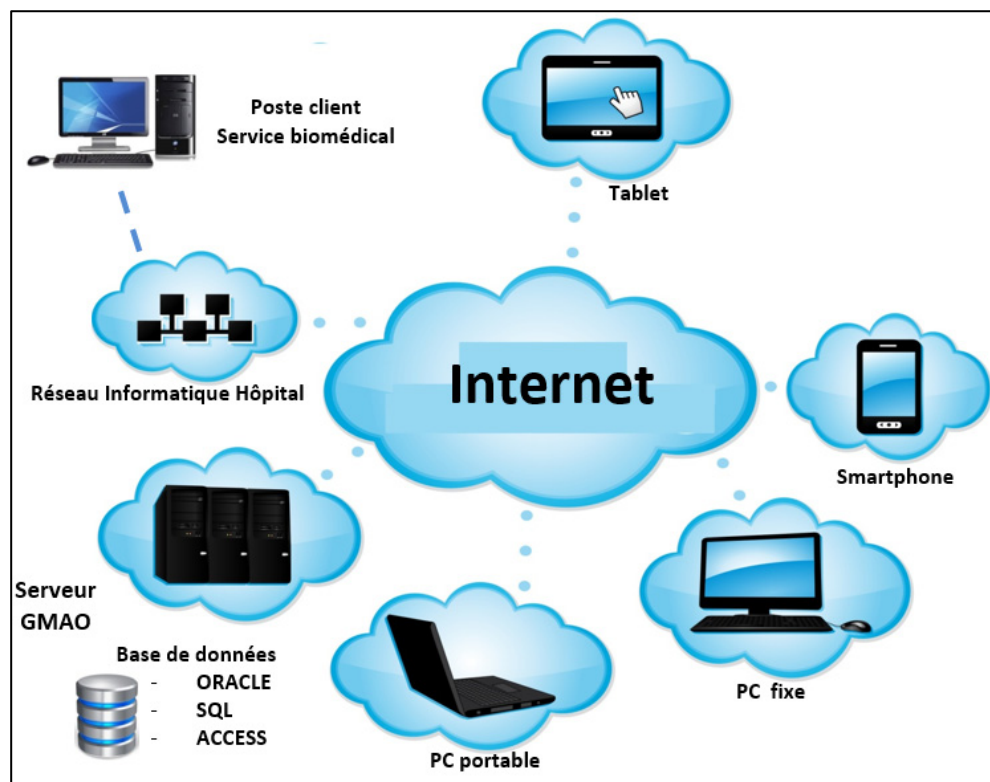


Figure 6.3 Architecture GMAO WEB

iii. Architecture mixte (local client/serveur et WEB)

L'application est installée sur chaque poste local. L'ensemble des bases de données de GMAO se trouve dans le serveur local. Un accès sans restriction est possible sur le site avec une

supervision des droits d'accès selon les profils utilisateurs. Des restrictions sont effectuées sur le nombre de postes clients qu'il sera possible de connecter simultanément. Il est également possible d'accéder à distance aux données dans le serveur local, via internet à travers des terminaux de différente nature.

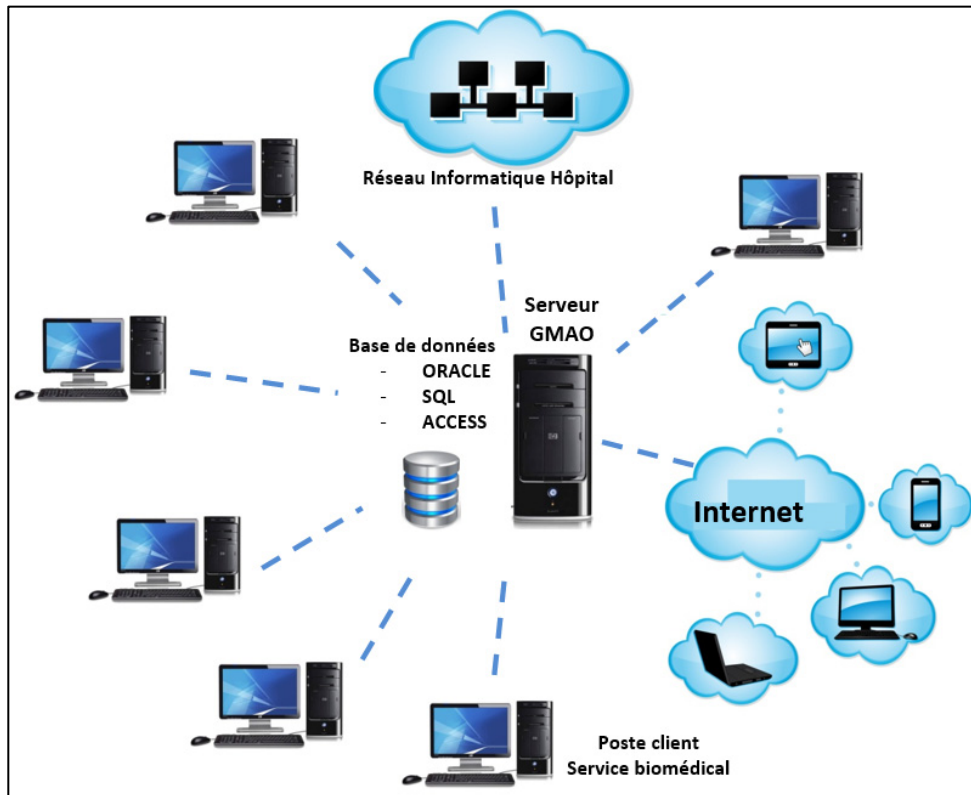


Figure 6.4 Architecture GMAO mixte (local client/serveur et WEB)

Cette architecture serait celle qu'on conseillerait pour l'hôpital Honoré-Mercier parce qu'elle permettrait à la fois d'avoir une architecture locale client/serveur qui permettrait de rendre possible l'utilisation des applications et du système GMAO. En cas de manque de connexion internet, l'architecture Web qui permettra de faciliter le déploiement et les mises à jour des applications à distance sans avoir à le faire localement pour chaque poste à la fois.

Point 4 : Effectuer une programmation modulable des logiciels afin que la programmation, le débogage, la maintenance et la mise à jour soient plus simples.

Point 5 : L'hôpital aurait un avantage à effectuer le test et le déploiement au fur et à mesure qu'on développe la nouvelle application Octopus ; ceci permettrait de tester plus rapidement les applications et de modifier les configurations qui ne correspondaient pas aux attentes avant que le projet ne soit terminé.

Nous avons simulé une procédure au chapitre 2 pour effectuer des choix de méthodes pour les algorithmes intelligents d'analyses et de traitement de données et nous avons effectué au chapitre 4 une sélection de quelques algorithmes qui correspondraient au modèle de maintenance 4.0 de l'hôpital Honoré-Mercier. Dans le cas d'une maintenance biomédicale, il est assez complexe de sélectionner une seule méthode pour les algorithmes de traitement de données à cause de la variété des types de données qui proviendrait des équipements ayant des principes de fonctionnements complètement différents.

6.2.5 Discussions sur la feuille de route

Établir une feuille de route nous a permis d'avoir une vue d'ensemble sur les grandes étapes du projet et la planification de leurs réalisations. Pour l'accomplissement des tâches correspondant à chaque étape du projet, nous suggérons d'utiliser la méthode agile qui consisterait à développer, tester, réaliser et finaliser individuellement les tâches de chaque étape du projet sur une période précise avant de passer aux prochaines étapes. Nous n'avons pas détaillé le développement et le déploiement des algorithmes intelligents dans la feuille de route (Figure 4.7) que nous avons établie, parce que celui-ci constitue en soi un projet qui nécessiterait d'établir une autre feuille après avoir réfléchi à la planification du projet.

Il serait aussi important de réaliser une évaluation de budget disponible pour le projet et si possible d'inclure la répartition du budget dans la feuille de route. Obtenir une garantie de la disponibilité des fonds pendant toute la phase de réalisation du projet permettrait d'anticiper sur les ajustements à faire au niveau du projet et des dépenses. Il est aussi important de tenir compte du budget pendant la phase de conception des idées afin de pouvoir élaborer des idées qui seront proportionnelles au budget qui sera alloué pour le projet.

6.3 Avantages et inconvénients du modèle prévisionnel de maintenance 4.0

Les raisons pour lesquelles il peut être nécessaire de mettre en place un système de maintenance 4.0 dans un hôpital peuvent varier en fonction des objectifs et des priorités qu'on définit. Les avantages et inconvénients de migrer vers le modèle de maintenance 4.0 sont pour la plupart reliées au volet économique budgétaire de la maintenance biomédicale à court et à long terme, mais aussi pour améliorer la qualité des services en effectuant un meilleur suivi des équipements. Le tableau 6-1 ci-dessous présente de façon détaillée les avantages et les inconvénients d'avoir un système de maintenance 4.0 à l'hôpital Honoré-Mercier.

Tableau 6.1 Avantages et inconvénients d'avoir un modèle de maintenance 4.0 à Honoré-Mercier.

Avantages du modèle de maintenance 4.0	Inconvénients du modèle de maintenance 4.0
Une meilleure gestion de la durée de vie des équipements et des pièces de rechange	Dépenses assez importantes pour mettre en place le modèle 4.0
Une meilleure anticipation des éventuelles pannes qui pourraient arriver	Dépenses supplémentaires pour maintenir et effectuer les mises à jour des algorithmes intelligents
Réduction du temps de réparation des équipements	Le temps supplémentaire à accorder au système de maintenance intelligent pour effectuer les mises à jour et une veille technologique
Amélioration des services de maintenance	Dépenses supplémentaires pour former les employés à l'utilisation des nouveaux logiciels.
Amélioration de la spécificité et de la présentation des bilans financiers	La compétence nécessaire pour mettre en place ce système se fait rare.

Avantages du modèle de maintenance 4.0	Inconvénients du modèle de maintenance 4.0
Une amélioration de l'espace et des méthodes de travail	Les difficultés qu'il va falloir traverser en attendant que le système atteigne sa maturité (interruption des services, perte d'argent, restriction des services de maintenance)
Amélioration du taux de rendement de maintenance	Les couts des tests et des déploiements, en attendant que le système atteigne sa maturité et soit efficient (effet positif) au niveau organisationnel et au niveau des interventions.
Une amélioration de la gestion des crises et des interventions de gardes	
Amélioration de la qualité des soins de l'hôpital	
Amélioration de la gestion du parc équipements	
Réduction du temps d'arrêt et des probabilités de défaillances des équipements	
Une meilleure évaluation des risques d'apparition des pannes sur les équipements médicaux	
Une réduction du cout des réparations inutiles	

Tableau 6.2 Avantages et inconvénients d’avoir un modèle de maintenance 4.0 à Honoré-Mercier (suite)

Avantages du modèle de maintenance 4.0	Inconvénients du modèle de maintenance 4.0
Une analyse du cout de la maintenance individuelle de chaque équipement	
Une évaluation individuelle des performances de chaque technicien	
Une possibilité d’effectuer des analyses statistiques individuelles de chaque équipement pour optimiser leurs opérations.	
Une possibilité d’effectuer un suivi personnalisé de chaque équipement à temps réel.	
Une réduction du gaspillage des pièces de rechange	

Nous avons recensé plus d'avantages que d'inconvénients à installer un modèle de maintenance 4.0, bien que ça soit un projet que nécessitera un déploiement de fond assez important à court terme ; il permettra de réaliser des économies considérables à long terme grâce à l'amélioration de la gestion du parc équipement et à l'exploitation efficiente des données de maintenance. Même si on prenait la décision de ne prendre aucune mesure pour commencer à mettre en place ce système maintenant ; ceci sera encore plus dispendieux à mettre en place dans les années futures et la transition sera plus difficile et prendrait plus de temps.

6.4 Analyse économique

D'après les analyses du système de maintenance biomédical actuel à l'hôpital Honoré-Mercier que nous avons effectué au chapitre 4, les pertes financières pourraient être causées par :

- Les contrats de prestation non partagés,
- Le prolongement des délais de résolution de pannes sur les équipements,
- La qualité des services et le temps de résolution des pannes,
- Les pertes de temps au niveau des services fournis,
- L'impossibilité d'anticiper sur les futurs pannes et perte de temps,
- Les délais de réparation trop longs même si l'intervention est mineure, du fait que le prestataire doit se déplacer à chaque fois,
- Les arrêts de services,
- Les délais de réparations plus longs à cause de la rupture ou du manque de suivi au niveau du renouvellement des pièces de rechange,
- Les retards au niveau des réparations de nouvelles générations d'équipements,
- L'absence de procédé pour valider si les maintenances préventives et correctives sont faites selon les recommandations,
- Le manque de valorisation ou d'exploitation des données des pannes qui sont récurrentes,
- L'impossibilité de diminuer la fréquence de répétition de ces pannes,
- Le laxisme au niveau de la rédaction des rapports étant donné que les données ne seront pas exploitées plus tard,

- Le temps entré dans Octopus pour les activités n'est pas réel et se fait plutôt selon une estimation.

La plupart des raisons liées aux pertes financières convergent toutes vers la mauvaise gestion, les pertes de temps et la qualité des services, les méthodes de travail manuelles, la mauvaise ou la non-exploitation des données. Toutes ces raisons justifieraient le passage de la maintenance vers le 4.0 qui ne repose pas seulement sur l'utilisation des données et des algorithmes intelligents, mais qui consiste à revoir toutes les méthodes de travail et si possible automatiser certaines procédures. Les données sont des ressources riches en informations et l'un des objectifs de la maintenance 4.0 c'est d'automatiser certains procédés pour être sûr d'obtenir les données réelles afin d'évaluer et d'optimiser les coûts. Automatiser l'exploitation des données permettrait par exemple d'obtenir des tableaux avec les facteurs de perte de temps, d'argent, de ressources qui ne seront pas justes des estimations provenant des données entrées manuellement dans le système GMAO.

Nous avons listé dans le tableau 5.1 les avantages d'opter pour un système de maintenance 4.0 dans un hôpital, mais une chose importante à mettre avant serait la disponibilité des fonds pour la réalisation du projet. Le budget peut influencer sur une prise de décision par exemple sur le choix d'un équipement qui n'a pas été recommandé pendant l'évaluation du projet, ce qui ferait changer en partie la configuration des certains aspects du projet. Une augmentation du budget pourrait aussi rehausser la qualité du système qu'on voudrait mettre sur pied ; donc il faudrait pouvoir se projeter dans le futur en essayant d'effectuer une bonne spéculation sur la disponibilité des fonds au moment de l'évolution du projet.

La discussion et les résultats abstenus après avoir suspendu le projet dans notre premier cas pratique ne seront pas suffisants pour réaliser une analyse approfondie. Nous avons donc dû pour ce cas nous limiter quelques recommandations et une proposition d'un plan de collaboration entre l'organisation et l'équipe qui était chargée de mettre sur le pied le projet de maintenance 4.0.

Les outils que nous avons cependant développés dans le deuxième cas pratique nous ont permis d'effectuer une évaluation approfondie et de faire des recommandations pour un plan

d'implantation. Les recommandations majeures qui en ressortent sont principalement liées au système de GMAO utilisé, à la collaboration des employés et à l'exploitation des ressources. Le tableau 5.1 des avantages et inconvénients présente plus d'avantages que d'inconvénient à installer un modèle de maintenance 4.0 à l'hôpital, bien qu'il n'existe pas forcément de grandeur d'ordre affecté à leur importance. Il faudrait donc dans ce cas de figure se fier aux objectifs et aux attentes de l'organisation. Les limites financières actuelles de la maintenance sont causées par la gestion, les services internes et externes, la logistique, la gestion du temps, l'exploitation et la gestion des données, etc. Comme on l'a vu dans les chapitres précédents, le succès d'un projet de maintenance 4.0 passerait d'abord par le changement des cultures, de mentalités, des habitudes et l'acceptation du changement. Après avoir analysé les tenants et les aboutissants de la réalisation d'un projet de maintenance 4.0, on devrait être capable d'établir un bilan afin de justifier sa faisabilité et son utilité.

CHAPITRE 7

BILAN ET PERSPECTIVES

Une des préoccupations des organisations avant de décider de l'implémentation d'un projet est très souvent d'avoir de bonnes perspectives et d'être capable de ressortir lors de son analyse et de sa présentation. Notre préoccupation dans ce chapitre serait d'évaluer les perspectives des deux cas pratiques étudiés en fonction du niveau de progression du projet. Pour répondre à cette préoccupation, nous établissons un bilan sur plusieurs aspects des études préliminaires menées en vue de l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0. Nous allons aussi établir les limites et les difficultés qu'on pourrait rencontrer pendant son implémentation ; les perspectives et évolutions futures une fois qu'un projet de maintenance 4.0 est implanté.

7.1 Bilan

7.1.1 Récapitulatif des méthodes de travail et d'analyses

Les procédures utilisées dans nos études afin d'établir une méthodologie d'étude et de mise en place d'une maintenance 4.0 peuvent être regroupées en 4 principales étapes :

- **La Phase d'exploration des méthodes et connaissances existantes sur la maintenance**

Dans cette étape nous avons effectué une revue de littérature des articles sélectionnés en rapport avec le thème de nos recherches. Cette revue d'article nous a permis d'appréhender les définitions de la maintenance et les différentes directions à suivre pour mettre sur pied des opérations de maintenance. Nous avons aussi effectué une synthèse des méthodes de prétraitement, d'entraînement, d'analyses et de classification des données qui seraient en accord avec l'orientation des recherches de notre mémoire.

- **La phase d'étude des algorithmes de traitement de données et des méthodes préliminaires à l'implémentation d'une maintenance.**

Étudier le principe de fonctionnement des industries dans lesquelles nous devrions effectuer nos recherches nous a permis d'étudier leur parc matériel et les possibilités de leur connexion ou interconnexion grâce à l'internet des objets. Dans l'étape suivante, nous avons étudié

différents processus et possibilités de transmission des données (si possible via des capteurs intelligents). Nous avons ensuite examiné les méthodes de suivis, de vérification et d'interprétation des données et nous avons proposé une méthodologie d'étude de la construction des modèles de données, des moyens d'alerte, de validation, d'approbation et de demande des travaux de maintenance.

Le processus de transformation et d'exploitation des données de maintenance, nous a aidé à sélectionner des algorithmes de traitement des données de maintenance et de proposer un arbre décisionnel de choix d'un algorithme de traitement des données qui serait compatible avec notre projet.

- **La phase d'assimilation des concepts préétablis**

Elle nous a permis d'utiliser les méthodes définies au chapitre 2 pour étudier le principe de fonctionnement de la station d'épuration des eaux usées de Montréal (spécifiquement pour les sections 656 et 665) et celui de la maintenance biomédicale de l'hôpital Honoré-Mercier tout en effectuant leur vigie technologique. Nous avons aussi énuméré les possibles actions qui, une fois effectuées, pourraient permettre d'optimiser leurs systèmes et opérations de maintenance. Les méthodes énoncées au chapitre 2 nous ont aussi permis de proposer des outils et méthodes d'analyse et d'intégration des logiciels de traitement de données dans la maintenance biomédicale à Honoré-Mercier. Nous avons étudié la possibilité pour cet hôpital de migrer vers la maintenance 4.0 en appliquant les outils et méthodes explorées pendant nos recherches et en étudiant la maturité numérique du parc d'équipement et du fonctionnement de la maintenance biomédical. Grâce aux concepts de gestion du changement, à l'élaboration des outils de transition numérique et à la maîtrise des critères de succès et d'échecs d'un projet de transformation numérique, nous avons parcouru presque toutes étapes préliminaires à l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0, démontré sa faisabilité et énuméré les avantages d'opter pour sur ce type de maintenance.

Grâce à l'arbre décisionnel établi au chapitre 2, nous avons pu effectuer une simulation et proposé des choix d'algorithmes de traitement des données qui pourraient être utilisés pour la maintenance prévisionnelle à Honoré-Mercier.

- **La phase de planification de l'implémentation des nouveaux concepts**

Dans cette étape nous avons proposé une feuille de route qui permettrait de planifier et de coordonner de façon optimale les différents travaux à effectuer afin d'installer un de système de maintenance 4.0 à Honoré-Mercier. Cette feuille de route pourrait nous aider à planifier la répartition du budget du projet et à définir le plan de connexion du modèle prévisionnel, ses avantages et inconvénients, ainsi que les répercussions économiques de l'implanter.

7.1.2 Bilan organisationnel

La gestion de la maintenance est un des éléments essentiels à remettre en cause lorsqu'on voudrait établir un modèle de maintenance 4.0. Celle de l'hôpital Honoré-Mercier que nous avons étudié est fonctionnelle, mais nous avons pu relever des manquements au niveau :

- **De l'organisation de l'espace de travail**

La première des choses que nous avons pu remarquer au début de notre stage était l'aménagement de l'espace de travail qui était mal organisé. Mon arrivée en tant qu'employé n'avait pas été planifié et j'ai dû attendre qu'un autre employé démissionne avant de pouvoir obtenir un espace de travail non improvisé. Nous étions dans l'obligation de déplacer quotidiennement des affaires pour faire de la place ou du rangement parce qu'il n'y avait aucune logique et aucune constante dans l'organisation de l'atelier.

L'organisation de l'espace de travail est un des facteurs de perte de temps et d'efficacité. Le temps consacré au rangement est du temps perdu qu'on aurait pu utiliser pour des tâches directement reliées à la maintenance. Il serait plus intéressant d'attribuer une position permanente aux outils de maintenance, aux pièces de rechange et autre afin d'éviter de perdre du temps entre et pendant les processus de maintenance.

- **Des procédures de maintenance préventive et corrective**

Les procédures de maintenance préventives et correctives ne sont pas rédigées d'avance pour tous les équipements. Pendant la procédure de maintenance d'un équipement, les techniciens doivent rechercher des informations sur des équipements qui sont installés depuis des années

dans l'hôpital sur internet ou dans les guides d'entretien. Le processus de recherche d'informations est une étape qui peut prendre souvent plusieurs heures particulièrement lorsque les dossiers des manuels sont difficilement accessibles et mal organisés, ce qui est le cas de l'hôpital Honoré-Mercier. Toutes les informations ou procédures qui ont déjà été consultées au moins une fois devraient être résumées et sauvegardées de façon à être faciles à trouver et à consulter pour les autres techniciens afin d'économiser du temps pendant la procédure de maintenance.

L'hôpital possède même une application qui permet d'enregistrer les procédures de maintenances, mais cette application n'est presque pas utilisée et ne contient que des procédures de maintenance de deux types d'équipements. Une autre des suggestions qu'on leur a fait concernant ce point est de pouvoir valider les procédures utilisées pour les maintenances correctives afin de s'assurer qu'elles ne sont pas improvisées et qu'elles ne causeront pas de préjudice plus tard.

- **De l'utilisation des logiciels**

Les logiciels sont des outils indispensables qui permettent de faciliter le travail de maintenance, mais dans le cas de l'hôpital Honoré-Mercier, un des constats qu'on a pu faire, c'est que ces applications sont sous-exploitées ou mal exploitées, ce qui rendrait les données sauvegardées inexploitable et difficiles à analyser afin de trouver des solutions aux futures pannes.

- **De la gestion des alertes**

La gestion et le suivi des alertes sont effectués par les agents administratifs qui ne maîtrisent aucun terme technique de la maintenance biomédicale. Ceci pourrait causer une mauvaise interprétation de l'alerte ou des actions effectuées pour les régler, donc l'idéal serait de confier leur gestion directement aux techniciens biomédicaux.

- **De l'organisation et la gestion de pièces de rechange**

Les pièces de rechange sont mal organisées, égarées, parfois introuvables et non répertoriées, ce qui ralentit les réparations des équipements. Il serait avantageux pour l'hôpital d'avoir un

meilleur suivi et une meilleure gestion de leur stock de pièces de rechange afin de sauver du temps de réparation et de réaliser des économies financières.

- **De la répartition des tâches et responsabilités**

Dès le début de mon emploi à Honoré-Mercier, j'ai dû me former en autodidacte pour apprendre la maintenance des équipements et au début de mon emploi, j'étais obligé de demander à chaque fois à mon coordonnateur ce qu'il y avait à faire. Ceci est une conséquence de la mauvaise organisation ou répartition des responsabilités et cause beaucoup de perte de temps qui aurait pu être consacré au dépannage.

- **De la rédaction des rapports de maintenance**

La rédaction des rapports des maintenances est une opération qui permet d'avoir une traçabilité des pannes déjà survenues sur un équipement et des actions qui ont été prises pour les régler, mais nous avons pu constater que les rapports étaient mal rédigés et qu'ils manquaient des détails ou ils étaient parfois inexistantes. La non-conformité des rapports de maintenance rendrait inexploitable les données de maintenance pour la construction des algorithmes intelligents de maintenance prévisionnelle.

- **De la gestion des données**

Nous avons pu constater qu'aucune gestion ou exploitation des données n'était faite pour améliorer la maintenance. Pour y remédier, il serait essentiel de commencer par définir, sélectionner et sauvegarder les données qui contiennent des informations exploitables ; ensuite, il va falloir automatiser certaines procédures pour rendre la rédaction des rapports plus uniformes et afin il faudrait utiliser des algorithmes intelligents pour construire un modèle prédictif de maintenance.

7.1.3 Bilan maintenance

Deux types de maintenances sont présentement pratiquées à l'hôpital Honoré-Mercier, la maintenance préventive et corrective. Leur planification de la maintenance corrective consiste essentiellement à attendre qu'un des départements crée une requête dans Octopus pour signaler un dysfonctionnement, ensuite le technicien ira intervenir sur place ou va ramener l'équipement à l'atelier pour le réparer. Cette façon de procéder crée une surcharge de travail et des arrêts de services assez fréquents, ce qui fait perdre du temps et de l'argent à l'hôpital et rend le service de maintenance biomédicale moins efficace. Une suggestion que nous leur avons faite est d'effectuer des tournées matinales régulièrement dans les différents départements pour s'enquérir de la situation des équipements avant qu'ils ne soient hors services au moment du dysfonctionnement.

Le bilan des maintenances préventives effectué à l'année est jugé positif en fonction du nombre d'équipements dont la maintenance préventive a été déclarée complétée dans Octopus même si toutes les maintenances préventives n'ont pas été complétées. Évaluer le bilan des maintenances préventives de cette façon pourrait être satisfaisant à court terme ; mais pour les équipements dont la maintenance préventive a été repoussée, ceci pourrait accélérer leur dégradation. Repousser les dates de maintenances préventives pourrait accélérer la dégradation des équipements, augmenter, la charge de travail au moment où il va falloir rattraper le retard, augmenter la fréquence des arrêts de service, dégrader la qualité des services, causer des pertes de temps et d'argent, etc.

Une suggestion de solution pour y remédier serait de passer au modèle prédictif de maintenance 4.0 et d'utiliser des algorithmes intelligents de traitements de données pour la planification des opérations de maintenance préventive et des autres aspects de la maintenance corrective pour gagner du temps qui sera réaffecté aux opérations de maintenance préventive. Une autre suggestion pour améliorer la maintenance serait d'acheter plus d'outils d'aides à la maintenance, de préférence les plus récents et les plus efficaces pour que chaque technicien puisse avoir son propre matériel afin d'éviter de perdre du temps pendant le processus de maintenance. Les concepts de maintenance 4.0 devraient aussi permettre aux principaux acteurs de se remettre à chaque fois en question pour détecter ce qui pourrait être amélioré.

7.1.4 Bilan de veille technologique

Le département biomédical ne possède actuellement aucune procédure mise en place pour assurer la veille technologique de l'hôpital ; sauf si on pourrait considérer les recherches que les ingénieurs font pour avant de choisir de nouveaux équipements même si leur choix est souvent influencé par le budget. En ceci qui concerne la maintenance en général, aucune action qui pourrait être apparentée à une veille technologique n'est mise en place ; c'est pour cette raison que nous leur recommandons d'effectuer une veille technologique avant et après avoir réalisé le projet de maintenance 4.0 afin de nous assurer que les méthodes et les outils utilisés pour la maintenance ne soient pas dépassés et qu'il ne soit plus difficile de rattraper le retard après.

La formation du personnel de santé reste aussi un vrai enjeu en ce qui concerne la maintenance 4.0 et parfois on fait face au rejet de certains équipements biomédicaux par le personnel de santé, tout simplement parce qu'ils ne veulent pas ou parce qu'ils ont du mal à s'habituer au fonctionnement des nouvelles technologies qui pourraient faciliter leur travail. Si on décide de former les techniciens sur la majorité des équipements médicaux, ceci leur permettrait à leur tour de former les utilisateurs de ces équipements et de les aider à s'habituer aux nouvelles technologies plus rapidement.

Une autre lacune est que l'interdiction aux techniciens à l'accès aux formations limite leurs actions qui sont aussi entre autres d'éduquer les utilisateurs, car pour la grande majorité de nouveaux équipements la plupart des dysfonctionnements signalés sont souvent dus à la mauvaise utilisation ou au manque d'assimilation des informations lors de la formation. Ces lacunes pourront être difficilement comblées par le technicien qui est le personnel biomédical le plus proche des utilisateurs s'il n'a lui-même pas reçu de formation. La conséquence de ce modèle de fonctionnement est que les utilisateurs feront appel très souvent aux manufacturiers de ces nouveaux équipements qui les feront payer pour ces services, ce qui rendra encore la maintenance plus dispendieuse.

7.1.5 Bilan financier

Le bilan financier est le plus souvent l'un des éléments clés qui pourraient causer la remise en question de la gestion d'un département et/ou des méthodes de travail. Il serait impossible pour nous d'évaluer de façon objective celui de l'hôpital Honoré-Mercier sans avoir tous les chiffres et les statistiques ; mais grâce à nos observations, nous pouvons dire qu'il y a beaucoup des manquements au niveau de leur maintenance biomédicale, ce qui leur fait perdre du temps et de l'argent. Selon nos observations, les pertes de temps et d'argent seraient dues aux manquements au niveau de la gestion inefficace des ressources, de l'atelier, du personnel, des priorités, de la non-automatisation de certains procédés, de l'insuffisance de ressources et de l'utilisation du matériel inadéquat pour la maintenance, etc. Une transition vers la maintenance 4.0 ne résoudrait peut-être pas immédiatement les manquements en maintenance, mais ça reste un modèle de fonctionnement qui pourrait être très bénéfique à long terme s'il est déployé comme il faut.

7.1.6 Bilan innovation

Nous n'aurons aucun récapitulatif à faire en ce qui concerne l'innovation tout simplement parce qu'il n'y en a jamais eu aucune en ce qui concerne la maintenance biomédicale à Honoré-Mercier ; mais nous avons rajouté cette section afin de pouvoir leur proposer de créer un atelier d'innovation qui pourrait servir à expérimenter et développer de nouveaux outils ou de nouvelle façon de faire avant de les déployer.

7.2 Bilan de maintenance 4.0 des organisations étudiées

Aux vues de trois types d'organisation étudiées dans notre mémoire, on constate que leur progression vers un modèle de maintenance 4.0 est différente à chaque fois. Nous avons procédé à l'étude de la maintenance de trois organisations complètement différentes, afin de voir des similarités au niveau de la démarche, des difficultés rencontrées et des recommandations faites. À l'exception des quelques petites similarités et du manque de personnel qualifié, on remarque que le bilan (Tableau 7.3) est différent à chaque fois. On pourrait donc dire que la méthodologie d'implantation d'un modèle de maintenance 4.0 dépend du type d'organisation, de son niveau de maturité et de progression vers la maintenance 4.0.

Bien que la méthodologie d'implantation pourrait différer en fonction du type d'organisation, on y trouve toujours des similarités dans les étapes à suivre pour implanter un modèle de maintenance 4.0. Cela signifie qu'on pourrait quand même s'inspirer de la méthodologie d'un autre type d'organisation pour établir celle que serait adaptée à la nôtre. Depuis son apparition, la maintenance 4.0 a toujours été un bon moyen de mettre en œuvre ce qu'on a toujours voulu faire dans les organisations afin d'améliorer les qualités des produits et l'exploitation des actifs. La valorisation des données pourrait donc nous permettre d'améliorer la maintenance. Cette amélioration pourrait donc se mesurer sur la base des critères de disponibilité, de qualité et de réduction des coûts des actifs.

Tableau 7.1 Récapitulatif de l'analyse des différents cas d'organisations étudiées

Lieu d'expérimentation	1 ^{er} cas : station d'épuration des eaux usées. (Gouvernement)
Types d'organisation	Industrielle (Usine)
Taille de l'organisation	Très grande
Parc d'équipements	Diversifié
Niveau de transformation numérique.	Très faible (La majorité des équipements et systèmes de contrôles sont analogiques et en processus de remplacement pour équipements numériques)
Progression vers la maintenance 4.0	<ul style="list-style-type: none"> • Parc équipement et systèmes de contrôles à renouveler au complet • Aucune valorisation de données • Gestion de la maintenance à redéfinir.
Difficultés observées	<ul style="list-style-type: none"> • Budget limité • mise en place de l'IOT (Accessibilité internet difficile dans des endroits retirés) • Prise de décision lente • Manque de personnel qualifié
Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Redéfinir la culture, la structure et des stratégies. Renouveler le parc matériel et l'organisation du leadership. • Recrutement ou Formation du personnel sur la valorisation des données

Lieu d'expérimentation	2e cas : Hôpital Honoré-Mercier (gouvernement)
Types d'organisation	Hôpital
Taille de l'organisation	Petite (département génie biomédical)
Parc d'équipements	Complexe
Niveau de transformation numérique.	Complexes et variés (un nombre important de technologies détenues par plusieurs fournisseurs)
Progression vers la maintenance 4.0	<ul style="list-style-type: none"> • Technologies avancées, mais beaucoup de variétés. • Beaucoup de réglementations à respecter • Aucune valorisation de données. • Gestion de la maintenance à redéfinir
Difficultés observées	<ul style="list-style-type: none"> • Trop de réglementation à respecter. • La plupart des équipements sont maintenus par les fournisseurs. • Un nombre important d'équipements, ce qui pourrait rendre l'exploitation des données complexes. • manque de personnel qualifié
Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Implanter la maintenance 4.0 en s'assurant que les réglementations sont respectées. • Collaborer avec les fournisseurs afin de bâtir une interface de partage de données et de rapports d'analyses des équipements qui seront directement exploités par la maintenance biomédicale. • Recrutement ou Formation du personnel sur la valorisation des données

Tableau 7.2 Récapitulatif de l'analyse des différents cas d'organisations étudiées (suite)

Lieu d'expérimentation	3e cas : Mine Eldorado Gold Québec (privé)
Types d'organisation	Mine
Taille de l'organisation	Moyenne
Parc d'équipements	Peu diversifié
Niveau de transformation numérique.	Débutant (Présence de l'IOT avec un début de valorisation des données de maintenance)
Progression vers la maintenance 4.0	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation des technologies avancées. • Début de valorisation des données. • Gestion de la maintenance à redéfinir
Difficultés observées	<ul style="list-style-type: none"> • Les données et les solutions détenues par les constructeurs. • Problèmes de coordination et changements continuels. • Visibilité à court terme du concept de la transformation numérique et la maintenance 4.0 • Manque de personnel qualifié.
Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Anticiper sur les prochaines étapes de la transformation numérique et de la maintenance 4.0 • Recrutement ou Formation du personnel sur la valorisation des données

Tableau 7.3 Synthèse de l'analyse des différents cas d'organisations étudiées

Lieu d'expérimentation ou l'cas :	Types d'organisation	Taille de l'organisation	Parc d'équipements	Niveau de transformation numérique.	Progression vers la maintenance 4.0	Difficultés observées	Recommandations
1 ^{er} cas : station d'épuration des eaux usées. (Gouvernement)	Industrielle (Usine)	Très grande	Diversité	Très faible (La majorité des équipements et systèmes de contrôles sont analogiques et en processus de remplacement pour équipements numériques)	<ul style="list-style-type: none"> - Parc équipement et systèmes de contrôles à renouveler au complet - Aucune valorisation de données - Gestion de la maintenance à redéfinir. 	<ul style="list-style-type: none"> - Budget limité - mise en place de l'IOT (Accessibilité internet difficile dans des endroits retirés) - Prise de décision lente - Manque de personnel qualifié 	<ul style="list-style-type: none"> - Redéfinir la culture, la structure et les stratégies. Renouveler le parc matériel et l'organisation du leadership. - Recrutement ou Formation du personnel sur la valorisation des données
2 ^e cas : Hôpital honoré-mercier (gouvernement)	Hôpital	Petite (département génie biomédical)	Complexe	Complexes et variés (un nombre important de technologies détenues par plusieurs fournisseurs)	<ul style="list-style-type: none"> - Technologies avancées, mais beaucoup de variétés. - Beaucoup de réglementations à respecter - Aucune valorisation de données. - Gestion de la maintenance à redéfinir 	<ul style="list-style-type: none"> - Trop de réglementation à respecter. - La plupart des équipements sont maintenus par les fournisseurs. - Un nombre important d'équipements, ce qui pourrait rendre l'exploitation des données complexes. - manque de personnel qualifié 	<ul style="list-style-type: none"> - Implanter la maintenance 4.0 en s'assurant que les réglementations sont respectées. - Collaborer avec les fournisseurs afin de créer une interface de partage de données et de rapports d'analyses des équipements qui seront directement exploités par la maintenance biomédicale. - Recrutement ou Formation du personnel sur la valorisation des données
3 ^e cas : Mine Eldorado Gold Québec (privé)	Mine	Moyenne	Peu diversité.	Débutant (Présence de l'IOT avec un début de valorisation des données de maintenance)	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation des technologies avancées. - Début de valorisation des données. - Gestion de la maintenance à redéfinir 	<ul style="list-style-type: none"> - Les données et les solutions détenues par les constructeurs. - Problèmes de coordination et changements continus. - Visibilité à court terme du concept de la transformation numérique et la maintenance 4.0 - manque de personnel qualifié. 	<ul style="list-style-type: none"> - Anticiper sur les prochaines étapes de la transformation numérique et de la maintenance 4.0 - Recrutement ou Formation du personnel sur la valorisation des données

Le tableau 7.3 de synthèse des trois cas étudiés dans nos travaux nous permet de retenir que les difficultés rencontrées dans la transition vers un modèle de maintenance 4.0 peuvent changer en fonction du niveau de transformation numérique, du type et de la taille de l'organisation. Cette synthèse nous montre que la technologie n'est pas le seul élément

important pour cette transition et qu'il est aussi à considérer l'aspect de gestion de maintenance autour. On remarque aussi dans cette synthèse que l'un des éléments qui revient le plus dans les difficultés rencontrées est le manque de personnel qualifié. Cela peut s'expliquer par le fait que ce sont des modèles de maintenance nouveaux qui sont toujours en étude. Ce qui nous a amenés à effectuer comme recommandation pour les 3 cas, une redéfinition des pratiques de maintenance pour adapter le nouveau et l'ancien comme on l'a vu au chapitre 1 et une formation du personnel sur la valorisation des données. Chaque cas est spécifique en son sens que l'analyse de la progression vers la maintenance 4.0 dépend de l'activité de l'organisation, de son type et de son niveau de maturité numérique. Un des exemples concrets de la valorisation des données, c'est l'amélioration des conditions d'utilisation des camions comme on a pu l'observer à la mine Eldorado Gold Québec. Un des avantages à long terme c'est le fait qu'on pourra économiser au niveau des coûts de maintenance, mais un des inconvénients par contre c'est qu'il faudrait investir beaucoup d'argent au départ pour de mettre ce système en place pour les résultats que sur le long terme.

Les cas d'étude de maturité présentés dans le tableau 7.4 sont les cas extrêmes parmi ceux que nous avons étudiés. Nous ne sommes pas passés à travers tous les paramètres pour étudier la maturité numérique de la station d'épuration des eaux usées (Tableau 7.4 couleur jaune), parce qu'elle est encore au tout début de son passage de l'analogie vers le numérique. Les équipements et les systèmes qu'ils utilisent ont presque tous analogiques et il est nécessaire d'avoir des technologies numériques interconnectées afin de prétendre progression vers un modèle de maintenance 4.0.

Grâce au concept d'interrelation entre les éléments de maturités présenté sur la figure 2.3 du chapitre 2, on pourrait comprendre que si une organisation est encore au tout début de sa migration vers un modèle de maintenance 4.0 ; on devrait se focaliser sur les éléments suivants :

- Structure ; Décisions,
- Stratégie (Vision and goal),
- Culture ; Valeurs partagées et normes.

On a pu constater grâce au schéma d'interrelation qu'en agissant sur ces éléments, cela aurait un impact sur les autres éléments de maturités.

Tableau 7.4 Comparaison des deux cas extrêmes du niveau de maturité des organisations étudiée

TABLE 7 THE ENTERPRISE MATURITY MATRIX				
ELEMENTS	MATURITY LEVEL			
	1: START	2: LOW	3: MEDIUM	4: HIGH
Strategy	Short-term goals; no vision	Direction and objectives are identified	Vision and strategy are well developed	Common vision; continuous reevaluation; <i>revitalization crisis</i>
Structure	Simple structure	Structured functionally	Complex structures; <i>red tape crisis</i>	Lean and mean structure
Decision	Centralized	Empowerment is limited; <i>delegation crisis</i>	Empowerment at profit center level	At team and individual levels
Teams	Individual heroics	Task teams	Process teams	Self-managed teams
Systems	Overlapping activities	Unconnected processes	Processes in place	Extended processes
Control	Informal control system	Diagnostic and quality checks	KPI; beliefs; boundaries	Interactive; beliefs; boundaries
Rewards	No formal system	Performance system	Strategic rewards	Balanced measures
HR	Personnel administration	Competency-based practices	Competence management	Continuous workforce improvement
Information flow, IT	Ad hoc use	Improved accessibility	Efficient process	Seamless integration
Style	Directing/telling; <i>leadership crisis</i>	Selling	Delegation with control	Delegating
Staff and skills	Enthusiasm; energy	Technical competences	Disciplined teamwork	Alignment with strategic goals
Shared values, norms	Founders' values	Implicit values	Explicit values	Internalized values
Culture	Adhocracy	Clan	Hierarchy	Market culture

Jaune : Maturité de la station d'épuration des eaux usées de Montréal

Vert : Maturité de la mine Eldorado Gold Québec

7.3 Limites et difficultés de l'implémentation du modèle prévisionnel de maintenance 4.0

Nous pouvons parfois comprendre que certaines entreprises ont du mal à se lancer pour migrer vers une maintenance ou une industrie 4.0 d'autant plus que certains de ses effets avantageux ne se remarqueront pas et ne commenceront à se ressentir que quelques années plus tard. Nous avons recensé quelques difficultés et limites auxquelles il faudrait éventuellement faire face si on voulait implémenter un modèle de maintenance 4.0, elles sont les suivantes :

- **Les données incomplètes ou mal sauvegardées.**

Les données erronées, incomplètes ou mal sauvegardées peuvent être à l'origine du ralentissement du projet étant donné qu'elles constituent un des éléments essentiels pour l'implantation d'un système de maintenance 4.0 ou pour le fonctionnement du modèle de prédiction de maintenance. Une autre difficulté qu'on peut rencontrer lors de l'implantation d'un système de maintenance 4.0 serait d'effectuer un suivi et d'éduquer les employés aux nouvelles structurations pour se rassurer que la gestion des données se fait selon la recommandation afin qu'elles puissent être exploitables ensuite.

- **Le temps de collecte de la quantité de données suffisantes pour avoir des résultats avec le modèle prédictif.**

Le temps d'apprentissage des algorithmes dans une maintenance prédictive est primordial et parfois très long, car il est nécessaire pour le fonctionnement de certains algorithmes d'avoir une quantité des données importante et représentative afin d'optimiser l'apprentissage. Cette quantité importante de données peut parfois prendre plusieurs années à obtenir, ce qui peut être un enjeu pour structurer les algorithmes, étant donné qu'il faudrait mobiliser des finances importantes pour concevoir des algorithmes dont les bénéfices de prédire les pannes ne pourront pas se ressentir dans un futur proche. Mobiliser des sommes importantes pour n'avoir que des résultats dans un futur éloigné peut parfois être un choix difficile à faire et qui parfois va nécessiter de sacrifier certains projets au détriment d'autres.

- **La contextualisation des algorithmes en fonction de la variété du type de données des équipements**

Le milieu hospitalier possède habituellement un nombre très élevé d'équipements et ceux qui peuvent être sélectionnés pour l'implémentation d'une maintenance prédictive proviennent de différents fabricants ou ont parfois des technologies complètement différentes ; ce qui peut faire varier le type de données qui y sont recueillies. Le choix d'un algorithme pour analyser les données des paramètres ou de maintenance d'un équipement peut varier en fonction du type de données recueillies sur cet équipement ; c'est-à-dire que pour chaque type d'équipement il va probablement falloir un algorithme de traitement de données différent, ce qui pourrait rendre la réalisation du projet du complexe en milieu hospitalier.

- **L'augmentation du personnel et la recherche d'une main-d'œuvre spécialisée**

La mise en place et la programmation des algorithmes intelligents nécessitent une main-d'œuvre qualifiée, expérimentée et spécialisée qui est souvent difficile à trouver parce que ce domaine est assez récent. Pour l'implémentation d'un système de maintenance 4.0, la programmation et l'analyse des données, il va falloir rajouter du personnel spécialisé à l'équipe, ce qui peut engendrer des coûts supplémentaires au lancement de projet jusqu'à ce qu'il porte ses fruits. Ceci peut très vite engendrer des coûts supplémentaires et créer un problème financier si l'hôpital ne peut supporter des coûts supplémentaires sur le long terme.

- **L'éducation du personnel sur les nouvelles configurations**

Il va falloir éduquer le personnel sur les nouvelles façons de travailler, les nouvelles procédures et le bien fait de la maintenance 4.0. Le temps d'adaptation et d'éducation peut être relativement long pour certains employés et représenter une difficulté pour le projet s'ils ne comprennent pas les concepts et l'importance d'appliquer les procédures comme il faut.

- **Les dépenses importantes pour la réalisation du projet**

La réalisation d'un projet de maintenance 4.0 peut nécessiter des réformes importantes pour une entreprise en termes de coûts, donc c'est une transition importante qu'il faut prendre le temps de bien planifier et étudier avant de s'y aventurer, étant donné que ses résultats sur le

plan financier ne seront pas immédiats. Avant de mobiliser des sommes importantes pour la réalisation de ce projet, il faudrait évaluer les priorités immédiates de la maintenance et évaluer le budget de fonctionnement du département pour être certains de ne pas empiéter sur la continuité des services pendant la réalisation du projet.

- **Il n'existe pas encore de protocoles ou directives pour réaliser et implémenter un projet de maintenance 4.0**

Une autre limite serait aussi que le 4.0 n'est pas encore un domaine dans lequel tout est contextualisé et dans lequel il existe des façons de faire précises et universelles qui ont déjà été testées et ont fait leurs preuves. Chaque projet est individuel et nécessite ses propres règles, ajustements et développements. Comme exemple, dans le cas où on aurait besoin d'utiliser une technologie pensée pour projet, mais qui n'existe pas encore, il va falloir la créer, ce qui pourrait ralentir un peu le projet ou nécessiter de faire des changements en fonction des technologies qui sont existantes, ce qui peut aussi parfois influencer la qualité des résultats prédits au départ.

- **La possibilité de faire communiquer les équipements grâce à une connexion internet**

Certains équipements médicaux n'offrent toujours pas aujourd'hui la possibilité de communiquer des informations ou de transmettre des données via internet ; ce qui peut représenter un frein pour la réalisation du projet de maintenance 4.0 étant donné que l'internet des objets est un des éléments importants qui entre dans la configuration d'une maintenance prédictive. Comme exemple, lors de nos visites à la station d'épurations des eaux usées pour évaluer le protocole d'implémentation d'une maintenance 4.0 ; une des problématiques était de rendre disponible la connexion internet dans tout le sous-sol dont la majorité des murs sont en béton et où se trouvent les machines. L'objectif était que les capteurs puissent transmettre régulièrement et de façon constante les données dans la base de données et aux algorithmes pour traitement et analyses, donc sans une connexion internet il serait difficile de mettre en place le système de maintenance prédictive sur ces équipements.

- **La décentralisation des services informatiques**

Le département informatique dans la plupart des industries est souvent dissocié du département de maintenance et tous les droits et accès aux logiciels et à certains équipements sont contrôlés par le secteur informatique ; ce qui peut rajouter un niveau de complexité dans la collaboration et la planification des activités pour la réalisation du projet.

- **L'interopérabilité entre les entreprises manufacturières, les autres services de maintenance et le service biomédical**

Certains équipements en fonction du type de pannes sont parfois maintenus par plusieurs services dans un milieu hospitalier ; donc afin de pouvoir collecter les données de maintenance pour évaluer l'état de santé d'un équipement dans ce cas de figure, il va falloir établir une bonne communication entre ces départements. Il est donc important de fluidifier et de favoriser une bonne communication entre ces différentes entités pour recueillir des données importantes qui serviront à améliorer la maintenance.

7.4 Perspectives et évolution future du modèle de maintenance 4.0

Rendus à cette étape de l'étude du processus de mise en place d'une maintenance 4.0, nous avons pensé utiliser la méthode agile pour implémenter de façon graduelle, efficace, rapide et progressive toutes les solutions proposées et recommandées, ainsi que les algorithmes intelligents de traitement des données de maintenance. Cette méthode nous permettra de diviser le projet en sous-projets pour nous fixer des objectifs à court terme en utilisant une méthode itérative et incrémentale.

Après avoir introduit, instauré et inculqué au personnel du département biomédical, les nouvelles procédures, méthodes de travail et nouveaux outils d'aide à la maintenance ; il serait question ensuite de faire une tournée d'inspection de l'hôpital pour recenser les équipements sur lesquels il serait possible d'effectuer une collecte de données pour les tester sur les algorithmes qu'on aura programmés. Ensuite il faudrait trouver à chaque type de données d'équipements une correspondance avec l'algorithme idéal pour traiter et analyser ses données.

Nous suggérons aux hôpitaux de n'acheter que des équipements qui permettent une communication via internet, ce qui favorisera l'exploitation de l'internet des objets pour améliorer la maintenance biomédicale et en prédiction de l'évolution de la maintenance 4.0 en général.

Nous ne savons pas encore quelles sont les limites de l'intelligence artificielle et jusqu'à quel point elle pourrait faire progresser la maintenance, mais nous pouvons quand même suggérer comme projet d'effectuer une auto-évaluation individuelle des équipements médicaux pour transmettre instantanément une alerte au système GMAO afin de prévenir et prédire les dégradations présentes et futures sur des équipements.

Afin de pouvoir nous assurer de l'application et du respect des nouvelles procédures de maintenance biomédicale en milieu hospitalier, nous proposons de mettre en place un organisme indépendant d'audit sur la gestion de la maintenance biomédicale dans les hôpitaux ; qui est l'un des secteurs très importants pour la survie, le bon fonctionnement et le développement des services médicaux dans un centre de santé.

À partir de cas pratiques observés dans nos recherches, nous avons pu établir un bilan basé sur le niveau progression de nos études dans chaque cas. Notre objectif étant d'établir un bilan et de présenter limites et perspectives de l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0.

Dans le premier cas de figure de ce que nous avons étudié, nous nous sommes limités aux visites des sections indiquées et nous avons établi un rapport de nos visites et présenté des recommandations pour les prochaines visites et moyens de collaboration afin de terminer les études préliminaires à l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0. Dans le deuxième cas pratique, nous avons pu effectuer tous les audits nécessaires afin de terminer les études préliminaires à l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0. Les outils et méthodes développées et explorées nous ont permis de présenter une démarche et un planning élaboré des actions à poser et des étapes à franchir pour l'hôpital avant passé à la phase d'implantation. Les études menées nous ont permis de nous rendre compte des manquements au niveau organisationnel et maintenance qui devraient être comblés afin de préparer la transition vers un modèle 4.0.

À partir de nos analyses et observations, nous avons pu identifier des points à améliorer qui permettraient d'améliorer la gestion des ressources et de faire davantage d'économies financières. L'implantation d'un modèle de maintenance 4.0 à l'hôpital serait avantageuse et innovante et s'assurer de sa veille est une étape nécessaire afin de continuer à la faire évoluer. Les études préliminaires que nous avons menées révèlent qu'il serait avantageux d'évoluer vers un modèle de maintenance 4.0, mais c'est un processus qui peut s'avérer long, qui demande patience, de la rigueur et qui pourrait nécessiter un investissement financier important de départ. Une fois rendu à l'étape qui correspondrait à la phase d'implantation et de fonctionnement d'un modèle de maintenance 4.0 nous serons capable de justifier avec des données l'efficacité des outils et méthodes d'études préliminaires proposées. Les améliorations que pourrait apporter la maintenance 4.0 se feront ressentir grâce aux améliorations en sécurité, santé et au niveau des bonnes pratiques d'exploitation des actifs.

CONCLUSION

Afin d'être en mesure de répondre à notre problématique qui était d'effectuer des études préliminaires à l'implantation d'une maintenance 4.0 qui pourraient être exploitées dans d'autres projets du même type ; nous avons dû subdiviser notre approche en sept parties. Dans la première partie, nous avons effectué une revue d'article pour présenter quelques méthodes d'algorithmes de prétraitement, d'entraînement et de classification de données. Nous avons pu remarquer que ces méthodes d'apprentissage et de traitement des données peuvent être regroupées en plusieurs catégories ; certaines peuvent nécessiter d'avoir au préalable un volume de données suffisantes et exploitables tandis que d'autres peuvent former leur modèle de données en exploitant directement les données sauvegardées à temps réel. Tous ces modèles de données sont basés sur des modèles mathématiques et des paramètres, mais il faut toujours garder en tête l'importance de choisir un modèle de données stable, fiable et adapté à notre projet lors du choix de nos algorithmes.

La première partie de notre mémoire nous a permis d'explorer l'état de l'art dans la maintenance et les différentes méthodes de traitement des données pour choisir celles qui étaient adaptées à notre projet qui dans notre cas, était d'étudier la possibilité de mettre en place une maintenance biomédicale 4.0 à l'hôpital Honoré-Mercier. Grâce à la littérature en lien avec la transition numérique et la maturité numérique, nous avons pu identifier des méthodes et sélectionner des outils qui nous ont permis de savoir quoi faire avant de se lancer dans un projet de maintenance 4.0.

Dans la deuxième partie, nous avons pu élaborer des démarches préliminaires à l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0 grâce à des outils explorés et développés en lien avec la gestion de changement, l'évaluation de maturité numérique et la transformation numérique. Nous avons élaboré un organigramme qui nous permettrait de choisir l'algorithme de maintenance 4.0 idéal adapté à l'organisation et au modèle de maintenance 4.0 qu'on voudrait implanter.

Dans la troisième partie, nous avons effectué une vigie technologique du secteur 656 et de la station d'épuration des eaux usées de Montréal et effectué des recommandations d'amélioration de la maintenance pour passer au modèle 4.0. Nous leur avons aussi donné quelques directives pour poursuivre le projet d'implémentation d'un modèle de maintenance 4,0 au moment de la transition de leurs équipements de l'analogie vers le numérique.

La quatrième partie nous a permis d'effectuer une vigie technologique pour cibler les sections les plus importantes qui seront le centre d'intérêt du nouveau modèle 4.0. Nous avons aussi étudié le fonctionnement de la maintenance biomédicale et des procédés de sauvegarde et d'exploitation de données qui existent déjà à l'hôpital Honoré-Mercier. Selon les réponses obtenues grâce à ces études, nous avons pu ensuite répondre aux questions de l'arbre décisionnel pour effectuer un choix d'algorithme. En plus de proposer une méthodologie préliminaire à l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0 et à la sélection des algorithmes d'aide à la maintenance, il était important de proposer des idées de restructuration de la maintenance biomédicale qui seraient en adéquation ou qui permettraient de mieux accueillir le modèle de maintenance 4.0.

La quatrième partie nous a permis d'établir une feuille de route pour définir un plan d'installation du modèle de maintenance 4.0 en intégrant les remarques et suggestions pertinentes des décideurs.

La cinquième partie nous a permis d'expérimenter des méthodes de valorisation des données de maintenance. Nous avons exploité quelques exemples des données des alarmes des camions analysés afin d'identifier les paramètres qui devront être améliorés. Nous avons aussi comparé l'analyse de maturité numérique de la station d'Épuration des eaux usées de Montréal avec celle de la mine Eldorado Gold Québec afin de visualiser leur différence de maturité numérique. Cette comparaison nous a permis aussi d'observer les éléments de maturité numérique sur lesquelles se focaliser lorsqu'une organisation est au tout début du processus de transformation numérique et de maintenance 4.0.

La sixième a permis d'établir un plan d'implantation d'un modèle de maintenance 4.0, d'effectuer une réflexion un peu approfondie sur les outils exploités et développés tout en énumérant leurs avantages et inconvénients. Nous avons aussi dans cette partie effectuée une réflexion économique plutôt que novatrice du projet de maintenance 4.0.

Dans la septième partie, nous avons partagé des idées pour établir un bilan d'activité afin de détecter les limites du projet et de la maintenance 4.0 et de planifier une veille technologique future.

Le choix de développer cette méthodologie nous est venu de fait que nous n'avons pu trouver de littérature à ce sujet dans nos recherches. Cette méthodologie que nous avons élaborée correspondrait plus à une phase de préparation et d'amorçage qu'une phase d'amélioration. La procédure d'étude préliminaire d'implémentation d'une maintenance 4.0 que nous avons établie grâce aux différents thèmes traités dans nos chapitres doit être appliquée suivant l'ordre des idées énoncé pour être plus efficace. Cette stratégie que nous avons développée peut être appliquée dans un environnement similaire ou être adaptée pour être implémentée dans un environnement industriel différent.

À cause des contraintes de temps et de ressources, nous avons dû nous limiter à élaborer un plan d'implémentation de la maintenance 4.0 à l'hôpital Honoré-Mercier et pour donner suite à nos recherches nous recommandons d'appliquer notre méthodologie pour installer un modèle de maintenance 4.0 à Honoré-Mercier ou dans un environnement similaire. Une autre extension de nos recherches pourrait être aussi d'exploiter les données de maintenance pour faire fonctionner les algorithmes intelligents dans un modèle de maintenance 4.0 afin d'être en mesure de le comparer avec le modèle de maintenance classique déjà existant.

ANNEXE I REVUE DE LITTÉRATURE DE QUELQUES ALGORITHMES INTELLIGENTS

I.1 Méthodes de prétraitement des données

Le prétraitement des données est une opération qui consiste à préparer les données qui seront utilisées dans un modèle précis, afin d'en tirer le maximum d'informations pertinentes et exploitables. Le cadre dans lequel nous présenterons le prétraitement sera celui de la transformation numérique. Dans ce cadre, nous interpréterons le prétraitement comme un ensemble d'actions de sélection, normalisation, standardisation, formatage, nettoyage, discrétisation sur les données qui seront analysées plus tard à partir d'un algorithme permettant de classer de façon automatique les données sans intervention humaine. Les différentes méthodes sont les suivantes :

i. Sélection des caractéristiques pertinentes

Cette méthode consiste à faire un tri au niveau des caractéristiques d'un système pour déterminer celles qui pourraient nous fournir le plus d'informations sur l'évolution des performances et de son état de dégradation.

Une de ces méthodes est la redondance minimale de pertinence maximale (mRMR : minimum Redundancy Maximum Relevance). Cette méthode consiste à sélectionner les caractéristiques ayant une faible corrélation entre elle et une forte corrélation avec la sortie. Il est possible d'utiliser des méthodes statistiques et le coefficient de corrélation pour calculer la corrélation des caractéristiques entre elles et avec la sortie. Les caractéristiques sont ensuite sélectionnées une par une pour maximiser « *la fonction-objectif* », qui est la fonction de pertinence et de redondance. Les deux types de fonctions couramment utilisées pour le mRMR sont ceux basés sur des critères de différence d'informations mutuelles (MID : Mutual Information Difference) ou celles basées sur les critères de quotients d'informations mutuelles (MIQ : Mutual Information Quotient). Pour les données temporelles, les manipulations préalables permettant de transformer les données en une seule matrice sont nécessaires pour éviter des pertes d'informations. (Radovic, Ghalwash, Filipovic, & Obradovic, 2017). Une des études utilisant cette méthode comme solution pour le prétraitement des données est intitulée « Détection

d’anomalie basée sur la distance de Mahalanobis » (MD : Mahalanobis Distance). (Xiaohang Jin, 2012).

Elle est utilisée dans cet article pour faire le tri des caractéristiques redondantes (Figure I.1 : Utilisation de la méthode mRMR pour la section des caractéristiques pertinentes) d’un ventilateur de refroidissement de circuit électronique en minimisant les fonctionnalités des informations mutuelles et en les maximisant pour les entités et des classes (I.1), (I.2).

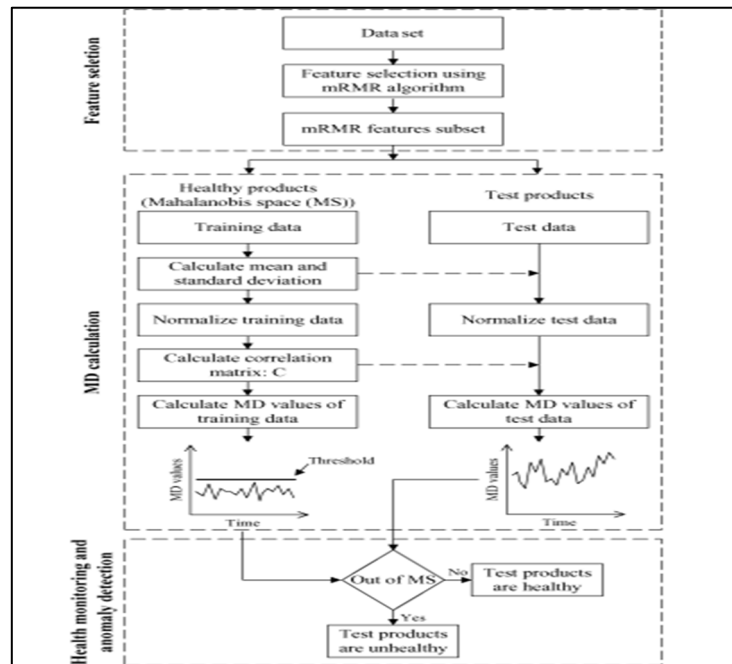


Figure I.1 Utilisation de la méthode mRMR pour la section des caractéristiques pertinentes
Tirée de Xiaohang Jin (2012, p2)

$$\min_{E \subset S} \frac{1}{|E|^2} \sum_{i,j \in E} I(f_i, f_j) \tag{I.1}$$

$$\max_{E \subset S} \frac{1}{|E|} \sum_{i \in E} I(c, f_i) \tag{I.2}$$

$|E|$ est le nombre d’entités dans le sous-ensemble d’entités recherchées E.

$I(f_i, f_j)$ est l'information mutuelle de deux entités f_i et f_j . Il est utilisé pour mesurer le niveau de similarité entre f_i et f_j .

S est l'espace des caractéristiques qui contient toutes les caractéristiques candidates.

$I(c, f_i)$ quantifie la pertinence entre la caractéristique f_i et dans la classe ciblée $c = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$.

Ces équations de min et max sont utilisées pour calculer respectivement la redondance minimale et la pertinence maximale des caractéristiques entre elles. Le minimum (I.1) permet de sélectionner l'ensemble qui regroupe les éléments ayant les plus petites distances entre elles, donc les caractéristiques rapprochées ayant plus de similarités et qui ensemble permettent d'avoir un pouvoir de prédiction important. Le maximum (I.2) permet de détecter les caractéristiques qui individuellement ont un pouvoir de prédiction élevé.

ii. Prétraitement des données par normalisation et standardisation

La normalisation est un concept de modélisation et de transformation des données permettant de rendre compatibles les variables de différentes échelles. Les données redondantes de maintenance peuvent entraîner des anomalies et rendre leur traitement automatique assez difficile, d'où l'importance de pouvoir éliminer des informations redondantes. Il existe plusieurs types de normalisations à savoir, la normalisation standard ou la standardisation, la normalisation entre 0 et 1, la normalisation Min-Max et la percentilisation qui est une autre forme de normalisation.

La normalisation standard ou standardisation est une normalisation z-score qui consiste à soustraire chaque valeur d'une donnée par la moyenne et à la diviser par l'écart-type. Cette technique est souvent utilisée pour les algorithmes qui supposent des données centrées sur 0 comme l'analyse des composantes principales (ACP).

La normalisation entre 0 et 1 est généralement utilisée pour les variables des données provenant des distributions différentes. Elle permet d'amener les variables des données entre 0 et 1 en les soustrayant par le minimum et en les divisant par le maximum des observations. Cette

technique peut aussi être utilisée pour ramener les variables des données entre des valeurs choisies en utilisant une formule beaucoup de plus générale.

$$\text{valeurs transformées} = a + \frac{(x - \text{Min}(x))(b - a)}{\text{Max}(x) - \text{Min}(x)} \quad (\text{I.3})$$

X : valeur d'entrée dans l'ancienne échelle

Les valeurs transformées : valeurs de sortie d'une échelle quelconque

a et b sont les valeurs Minimum et Maximum.

Min et Max sont respectivement les fonctions minimums et maximum.

La normalisation percentile est similaire au classement des variables ; mais au lieu de conserver leur valeur, on va plutôt les diviser par le rang maximal. Si les variables sont binaires, il transformera les valeurs 0 en pourcentage et les valeurs en 1 resteront identiques. (Q. Peter He, 2007). Les techniques de normalisation applicables sur des données peuvent varier en fonction de leur type qui peut être booléen, numérique, binaire ou analogique. Ceux que nous avons énoncés plus haut ne sont que des exemples de type de normalisation les plus souvent utilisés au niveau du prétraitement des données.

iii. Le formatage, Nettoyage et discrétisation

Le formatage des données peut être assimilé à une transformation des données pour les rendre compatibles avec les algorithmes d'analyse des données ou les systèmes sur lesquels ils fonctionnent. Il peut aussi être considéré comme application d'un ensemble de plusieurs techniques de prétraitement afin de les rendre compatibles avec le type de données prises en charge par les algorithmes de traitements des données.

Les différents formats des données couramment rencontrés sont notamment les TSV (tab-separated values), CSV (Comma Saparated values), HTML (Hyper Text Markup Language), XML (Extensible Markup Language), etc. La compatibilité du format des données avec les algorithmes n'est parfois pas suffisante pour garantir leur intégrité. D'autres critères tels que le nombre d'enregistrements, le nombre d'attributs, le nombre de valeurs manquantes et les

enregistrements des données incohérentes doivent être pris en considération. (Q. Peter He, 2007)

Le nettoyage des données est une opération de prétraitement qui consiste à identifier et à éliminer des données bruyantes et des aberrations ; supprimer des caractères ou des lignes pouvant interrompre ou perturber l'enregistrement ou l'alignement de données. Le nettoyage peut s'appliquer à presque tout type de données et permet aussi de compléter les valeurs manquantes. (Q. Peter He, 2007)

La discrétisation permet la conversion des données d'attributs continus en attributs catégoriels afin de simplifier leur exploitation en apprentissage automatique. Cette technique est une des étapes de l'échantillonnage des données qui peut aussi être une étape du prétraitement permettant de faciliter leur manipulation. (Q. Peter He, 2007)

Les données peuvent contenir des anomalies ou des valeurs incorrectes pouvant compromettre la qualité et le jeu de données provoquant des problèmes tels que : les attributs manquants, des enregistrements erronés, des enregistrements en conflit ou des contradictions. Toutes ces anomalies peuvent être éliminées grâce à l'application d'une ou d'un ensemble des techniques de prétraitement ci-dessus. (Q. Peter He, 2007)

I.2 Méthodes d'entraînement des données

Les méthodes d'entraînement de données utilisées en maintenance sont multiples et ont pour principaux objectifs de rendre possible l'apprentissage automatique à partir des algorithmes. Ceci permettant d'éventuelles prévisions des pannes et des dégradations des modules aussi bien mécaniques qu'électroniques. La plupart des études menées actuellement sur l'apprentissage automatique et le modèle de maintenance 4.0 ont des approches pronostiques basées sur des modèles de données (Data Driven) des équipements parce qu'ils s'appuient sur des données statistiques qui restent inchangées jusqu'à la détection d'une anomalie. La grande majorité des systèmes électroniques et équipements médicaux étant conçus selon des approches et des modèles de données mathématiques, probabilistes et statistiques, etc., nous focaliserons notre revue littéraire sur les algorithmes d'apprentissages automatiques des modèles de données prévisibles (Data driven).

Le but de notre recherche étant focalisé sur le modèle de maintenance 4.0 prévisionnelle des systèmes, nous avons mis l'accent dans notre revue de littérature sur des techniques d'apprentissages automatiques de type « *machine Learning* ».

Dans cette section, on distingue deux catégories d'apprentissage automatiques basées sur des systèmes dont on possède ou non des données saines et endommagées. Dans le cas où on possède des données, on parlera d'apprentissage automatique supervisé et dans le cas contraire d'apprentissage automatique non supervisé. Nous avons rassemblé les algorithmes étudiés dans nos revues en différents types d'algorithmes que nous avons étudiés.

I.2.1 Algorithmes d'apprentissage automatiques supervisés

Ce sont des algorithmes qui ont besoin des données saines en bon fonctionnement et endommagées en cas de dysfonctionnement des systèmes afin de rendre la maintenance automatique et prédire la durée de vie utile des systèmes. Les méthodes d'algorithmes supervisés passés en revue sont les suivantes :

i. Les méthodes de détection d'anomalies basées sur la distance

Les techniques basées sur la proximité consistent à calculer la discordance entre des données. Le but de cette technique est de vérifier le défaut d'harmonie entre les données que l'on compare. Afin de pouvoir évaluer l'hétérogénéité des données, plusieurs éléments de mesure peuvent être employés parmi lesquelles, la distance euclidienne et la distance de Mahalanobis. Les métriques étudiées dans nos revues de littérature sont les suivants :

a. Métrique basée sur la distance euclidienne : Les plus proches voisins (KNN)

La méthode d'apprentissage automatique KNN est un algorithme non paramétrique qui ne nécessite pas une connaissance particulière de la nature de distribution des données. Cet algorithme classe les objets en fonction de leur proximité avec les données utilisées pour mettre en place le système d'apprentissage automatique. Dans cette méthode, on va séparer les données en groupes ayant des comportements similaires et pour chaque nouvelle donnée, on va évaluer sa distance par rapport aux différents groupes (cluster) pour déterminer à quel groupe elle appartient. Les données ou les groupes de données les plus éloignés selon la

métrique de distance euclidienne des clusters seront utilisés pour l'apprentissage automatique de représentation d'une anomalie.

Les méthodes KNN peuvent être utilisées pour l'entraînement et la classification des données. Comme exemple, la procédure utilisée pour la création et l'apprentissage du système automatisé dans l'article (Q. Peter He, 2007) est la suivante :

- Pour chaque échantillon, chercher les k voisins les plus proches dans l'ensemble des données d'entraînement (training data),
- Calcul de la distance au carré kNN pour chaque échantillon sur la figure I.2, la distance au carré kNN de chaque échantillon est définie comme la somme des distances au carré de ses k plus proches voisins.

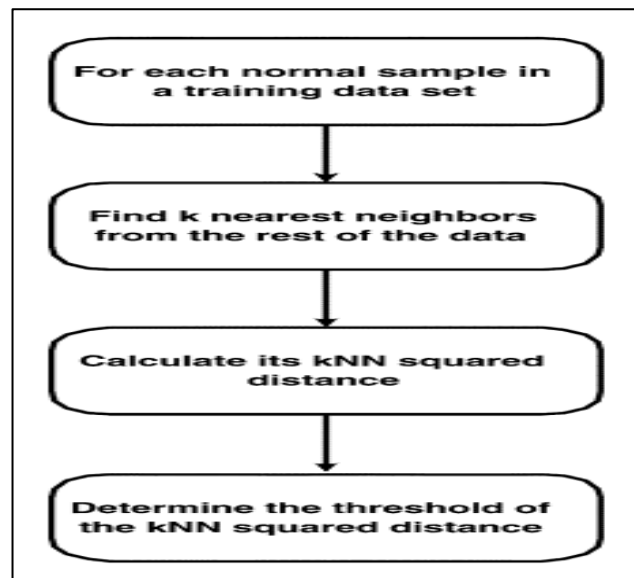


Figure I.2 Organigramme de la Construction du modèle d'entraînement kNN
Tirée de Q. Peter He and Jin Wang (2007, P.2)

Le calcul de la distance au carré de chaque échantillon se fait comme dans l'équation (I.4)

$$D_i^2 = \sum_{j=1}^k d_{ij}^2 \quad (\text{I.4})$$

D_i^2 est la distance au carré de l'échantillon i à son voisin j le plus proche.

- Détermination du seuil de détection des défauts.

La distribution de la fonction D_i^2 peut-être approximée par la distribution non centrale de chi-carrée ($\sum_1^k (\frac{x_i}{Q_i})^2$) à cause de son estimation qui est un processus aléatoire comme le calcul de D_i^2 .

Dans l'article que nous avons passé en revue, le seuil D_i^2 est déterminée en utilisant la fonction *chilimit* de Matlab dans le Toolbox PLS, mais d'autres moyens tels que la calibration ou le test des données sous une condition d'opération normale peuvent aussi être utilisés pour déterminer le seuil de détection des défauts.

b. Métriques basées sur la distance de Mahalanobis

La distance de Mahalanobis est une mesure basée sur la corrélation entre les variables par lesquels différents modèles peuvent être identifiés et analysés. C'est la distance entre deux points d'un espace multivarié permettant d'évaluer la similarité des données connues et inconnues. Cette technique diffère de la métrique de distance euclidienne par le fait qu'elle apporte un poids moins important aux données les plus éloignées et qu'elle prend en compte la corrélation des données. Elle permet de détecter les données aberrantes et de minimiser leur influence en évaluant leur variance élevée. Le calcul de la distance MD dans l'article (Xiaohang Jin, 2012) passé en revue a été fait en utilisant la méthode de matrice inverse suivante :

Si on considère les données d'entraînement nommées P ; P_{ij} est donc l'observation du j^{ieme} Paramètre où $i=1, 2, \dots, m$ et $j=1, 2, \dots, m$.

P_j et S_j sont la moyenne et la déviation standard respectivement du j^{ieme} paramètre (P_j) où $i=1, 2, \dots, n$. chaque paramètre de chaque vecteur (P_j) a été normalisé par la moyenne (P_j) et la déviation standard (S_j). Les valeurs ont été normalisées de la façon suivante :

$$z_{ij} = \frac{p_{ij} - \bar{P}_j}{S_j} \quad i = 1, 2, \dots, m \text{ et } j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I.5})$$

Où

$$\bar{P}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \quad (\text{I.6})$$

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{P}_j)^2}{m-1}} \quad (\text{I.7})$$

La distance MD est calculée de la façon suivante :

$$MD_i = \frac{1}{n} Z_i C^{-1} Z_i^T \quad (\text{I.8})$$

$Z_i = [Z_{i1}, Z_{i2}, \dots, Z_{in}]$, Z_i^T est le vecteur transposé de Z_i et C^{-1} est la covariance inverse de C la formule de C est la suivante :

$$C = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m Z_i^T Z_i \quad (\text{I.9})$$

Les données d'entraînement dans l'article (Xiaohang Jin, 2012) ont été normalisées en utilisant la moyenne et l'écart-type. La matrice de covariance utilisée pour la normalisation des données d'entraînement est la même utilisée pour le calcul de la distance de MD. La distance MD peut aussi être calculée à partir d'une mesure de dissimilarité entre 2 vecteurs.

ii. Méthode de classification de données à partir des machines à support des vecteurs

Une machine à support de vecteur est un modèle d'apprentissage automatique supervisé qui utilise l'algorithme de classification pour un problème de classification de deux groupes. Elle permet de déterminer à quel groupe une nouvelle donnée appartiendra parmi deux choix possibles. Cette technique est utilisée plus souvent pour la classification des données linéairement séparables, c'est-à-dire qu'il existe un hyperplan dans R^n tel que les données peuvent être séparées en deux classes des données étroitement liées de part et d'autre de cet hyperplan (Francoeur, 2010). La séparation des données en deux classes peut se faire selon une séparation catégorique (Hard margin) ou une séparation souple (soft margin) et l'hyperplan qui sépare les données en deux classes peut être de plusieurs natures (point, droite, plan, etc.)

Figure I.3

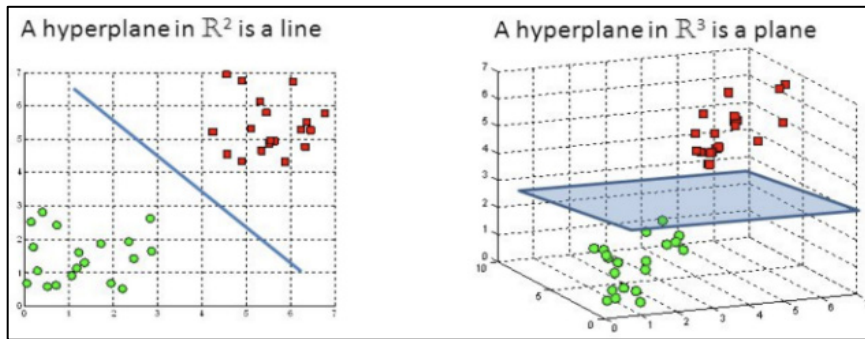


Figure I.3 Hyperplan 2D et 3D
Tirée de Gandhi (2018, P. 3)

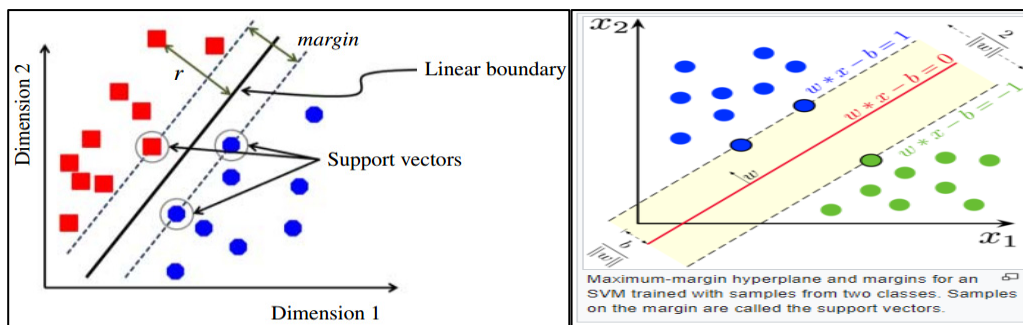


Figure I.4 Séparation catégorique (Hard marging)
Tirée de Gandhi (2018, P. 5)

La séparation linéaire catégorique (*Hard marging*) telle qu'on le voit sur la figure I.4 est implémentée de la façon suivante :

Pour un ensemble de points de données $\{(x_i, y_i)\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, dont les poids sont nommés W et b les biais on a :

$$W^T X_i + b > 0 \text{ si } y_i = +1 \tag{I.10}$$

$$W^T X_i + b < 0 \text{ si } y_i = -1 \tag{I.11}$$

Ces deux équations ci-dessus peuvent aussi être exprimées de la façon suivante :

$$W^T X_i + b \geq 1 \text{ si } y_i = +1 \quad (\text{I.12})$$

$$W^T X_i + b \leq -1 \text{ si } y_i = -1 \quad (\text{I.13})$$

L'objectif étant de maximiser $\frac{2}{\|w\|}$ ou de minimiser $\frac{1}{2}\|w\|^2$ tel que :

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1 \quad (\text{I.14})$$

Le SVM linéaire souple (soft margin figure I.5) est une classification de données appliquée sur des données linéaires avec la possibilité de laisser une ou deux valeurs de données d'une classe de l'autre côté de l'hyperplan.

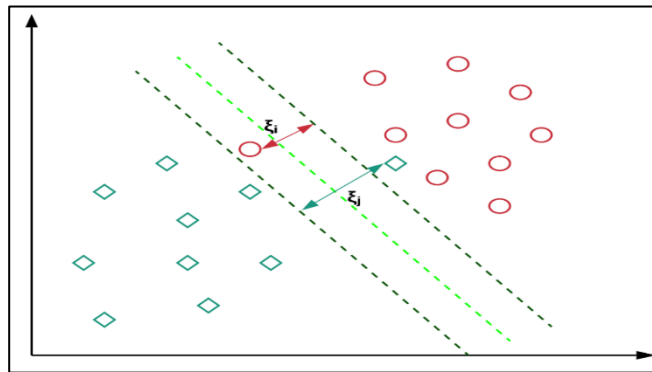


Figure I.5 Soft Marging
Tirée de Gandhi (2018, P. 5)

Sa formule est la suivante :

$$y_i(w^T \Phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i \text{ et } \xi \geq 0 \text{ pour tous les } i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I.15})$$

$$\text{minimiser } \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (\text{I.16})$$

ξ : Distance du point mal classé à la marge réelle

Si C est grand diminue la mauvaise classification, si C est petit, ça augmente la mauvaise classification.

En utilisant Lagrange, on obtient :

$$f(x) = \text{sgn}(\sum_{i=1}^n a_i y_i K(x, x_i) + b) \quad (\text{I.17})$$

$$K(x, x_i) = \Phi(x)^T \Phi(x_i) \text{ est connue comme la fonction noyau (kernel)} \quad (\text{I.18})$$

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|X_i - X_j\|^T), \gamma \geq 0 \quad (\text{I.19})$$

Le SVM non linéaire avec comme hyperplan un cercle se définit par l'équation suivante :

et $\xi_i \geq 0$ pour tous $i=1, 2, \dots, n$

$$\min_{R, a} R^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (\text{I.20})$$

$$\text{Sujet a } \|X_i - a\|^2 \leq R^2 + \xi_i \text{ et } \xi_i \geq 0 \text{ pour } i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I.21})$$

Cette équation peut être utilisée pour la discrimination ou pour la régression afin de prédire les valeurs numériques d'une variable. (David Vines-Cavanaugh, 2010 # 14)

I.2.2 Algorithmes d'apprentissage automatiques non supervisés

Ce sont des algorithmes qui n'ont pas besoin de l'utilisation d'un ensemble de données déjà connues pour apprendre les règles de classement.

i. Méthodologie d'analyse de données par corrélation : Analyse de composantes principales

Le calcul de la corrélation est une technique statistique qui permet de détecter le degré de liaison entre deux ou plusieurs variables. Une forte corrélation permet de vérifier la notion de causalité entre plusieurs variables, mais ne traduit pas toujours le fait qu'il y ait causalité ; comme c'est le cas pour les causalités communes (c'est-à-dire que la progression de deux ou plusieurs variables ne serait pas créée par leur corrélation, mais plutôt par une variable commune à toutes ces variables). L'analyse de composantes principales est une technique d'apprentissage automatique utilisant le principe de corrélation, qui est une approche statistique et géométrique (Figure I.6) pour transformer les variables dites corrélées entre elles en variables non corrélées. Les nouvelles variables non corrélées sont dites composantes principales ou axes principaux et seront utilisées pour rendre l'information contenue dans les données moins redondantes (Figure I.6). L'analyse des composantes principales (PCA : Principal component analysis) est un algorithme non supervisé utilisant un modèle linéaire pour réduire la dimensionnalité des données en les projetant dans un espace dimensionnel inférieur. C'est un modèle statistique qui est souvent utilisé pour des algorithmes de prétraitement des données et permet d'économiser de la mémoire de calcul.

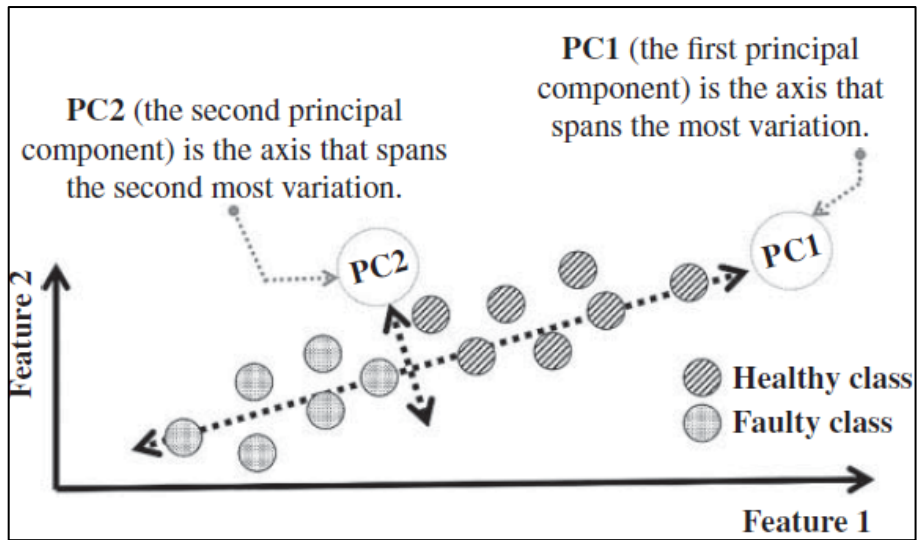


Figure I.6 Illustration d'une projection géométrique de PCA
Tirée de Kouatar (2017, P. 7)

Le principe de fonctionnement du modèle PCA est le suivant :

Etant donné un jeu de données $X = \{x^{(1)}, \dots, x^{(j)}\} \subset \mathbb{R}^N$ de dimension N , l'algorithme d'analyse de composantes principal va projeter X d'espace initial \mathbb{R}^N sur un sous-espace de dimension K tel que $K < N$ afin de maximiser la variance et de minimiser l'erreur de reconstruction. (Audigier et al, 2016)

Le calcul des composantes principales passe par le calcul du vecteur moyen de X

$$\mu = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^j x_j \quad (1.22)$$

Normaliser les données d'apprentissage pour avoir une matrice de données avec une moyenne de 0

$$D = [x_1 - \mu, x_2 - \mu, \dots, x_j - \mu] \quad (1.23)$$

Calculer la matrice de covariance C à partir de la matrice D

$$C = \sum_{j=1}^j (x_j - \mu)(x_j - \mu)^T = DD^T \quad (1.24)$$

Décomposer la matrice C en vecteur V_i et leur valeur propre λ_i telle que :

$$Cv_i = \lambda_i v_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.25)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^J (v_i^T \Phi_j)^2 \quad \Phi_j = (x_j - \mu) \quad (1.26)$$

Choisir le vecteur maximum V_k en triant respectivement les valeurs propres et les vecteurs propres tels que

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N \geq 0$$

$$v_1 \geq v_2 \geq \dots \geq v_N \geq 0$$

Choisir les composantes principales en sélectionnant les k premiers vecteurs propres.

$$W = [v_1, v_2, \dots, v_k]$$

Le jeu de données d'origine X est transformé à partir de W pour obtenir un espace avec un nombre d'entités k et de dimensions N en projetant les données sur le sous-espace afin d'obtenir les vecteurs propres et les vecteurs propres caractéristiques ; permettant d'avoir les vecteurs d'entité

$$Y = W^T(x - \mu), x \in R^N, Y \in R^N \quad (1.27)$$

L'article (Audigier et al, 2016) passé en revue utilise l'analyse des composantes principales pour déterminer la relation entre la température et le courant des cellules solaires. Celui-ci nous a permis d'obtenir une précision élevée avec très peu de paramètres (composantes principales). Le PCA est généralement associé à d'autres algorithmes de détection d'anomalies pour éviter de manipuler trop de paramètres. Cependant, un de ses inconvénients est qu'il ne renseigne pas sur le type d'anomalies.

ii. Méthodes de détection d'anomalies basées sur le regroupement

Le groupement des données est une technique d'analyse par groupe faisant partie d'un apprentissage automatique non supervisé de l'intelligence artificielle. Elle consiste essentiellement à regrouper des données ayant des similarités afin de pouvoir créer des logiciels de maintenance fonctionnant librement. (Québec, 2020)

a. Mise en œuvre du regroupement Fuzzy C-means

L'une de ces méthodes est le regroupement par la moyenne de flou de données (Fuzzy c-mean). Cette méthode qui est appliquée à chaque donnée d'entrée ne recherche pas l'appartenance, mais plutôt le degré d'appartenance à une classe. L'algorithme Fuzzy considère des frontières graduelles au lieu des frontières nettes entre les données. Cette technique est issue de l'algorithme C-mean et nécessite initialement la connaissance du nombre de classes de données. Toutes les classes sont caractérisées par leur centre de gravité et chaque point de donnée appartient à une classe avec un certain degré d'appartenance. (Hakima & 2009)

Les grandes étapes du FCM sont les suivantes :

- Initialisation des paramètres ε et m ,
- Calcul des centres des clusters (classe de données),

$$C_i^{(t)} = \frac{\sum_{j=1}^N (\mu_{ij}^{(t-1)})^m x_j}{\sum_{j=1}^N (\mu_{ij}^{(t-1)})^m} \quad (1.28)$$

- Calcul des distances D_{ijA}^2 avec,

$$D_{ijA}^2 = (x_j - c_i)^T A (x_j - c_i) \quad 1 \leq i \leq n_c, 1 \leq j \leq N \quad (1.29)$$

- Mise à jour des partitions floues,

$$\mu_{ij}^{(t-1)} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{n_c} (D_{ijA}/D_{kA})^{2/(m-1)}} \quad (1.30)$$

- On s'arrête lorsque : $\|U^{(t)} - U^{(t-1)}\| < \epsilon$ ou lorsque t et t-1 sont identiques sinon on recommence le processus à l'étape de calcul des clusters.

L'algorithme Fuzzy a déjà fourni des résultats satisfaisants notamment dans l'article (Piero Baraldia & Seraouic, 2014) passé en revue. Une des lacunes de la méthode FCM est liée à l'initialisation des centres des classes, mais une des façons de régler ce problème serait de mettre en place des calculs permettant de fixer automatiquement le nombre de classes. (Settouti, 2011)

b. Mise en œuvre du regroupement spectral

Le regroupement spectral est un algorithme non supervisé de partitionnement de données en groupes utilisant les vecteurs propres d'une matrice de similarité. Il est utilisé le plus souvent pour l'analyse des données ayant des propriétés spectrales. La méthode de regroupement spectrale consiste à extraire les vecteurs propres à partir des plus grandes valeurs propres provenant d'une matrice de similarité et ces vecteurs propres constitueront un espace dans lequel les données seront linéairement séparées (Mouysset, 2011). Le regroupement spectral est une séparation de graphe de données basées sur les nœuds des graphes (V), les arcs internœuds (E.) et la similarité entre les nœuds (W). Les grandes étapes du regroupement spectral sont les suivantes (kaoutar, 2017) :

- Construction du graphe de données G (V, E) Figure I.7,

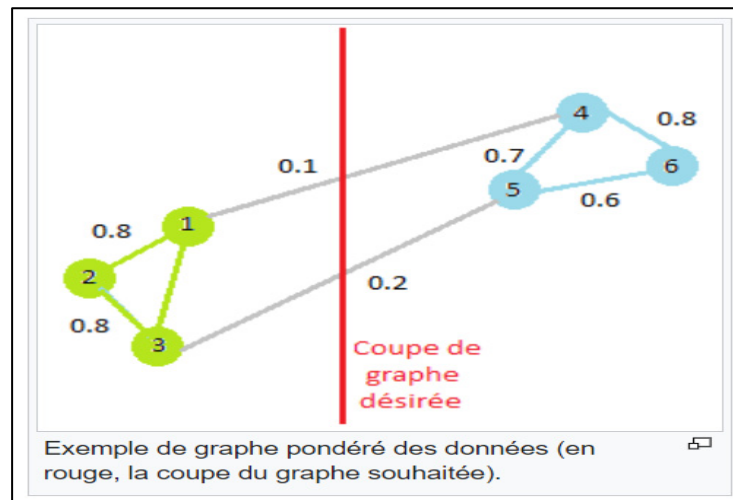


Figure I.7 Exemple de graphe de données $G(V, E)$
Tirée de Guillaumew (2020, P.2)

- Construction de la matrice de similarité W associée au graphe $G(V, E)$ Figure I.8,

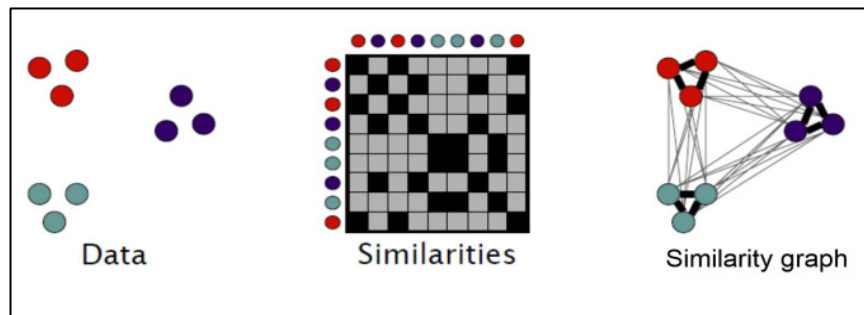


Figure I.8 Illustration d'un graphe de similarité
Tirée de kaoutar (2017, P. 7)

- Construction de la matrice laplacienne associée au graphe $G(V, E, W)$,
- Projection des objets dans l'espace spectral, basée sur les vecteurs propres retenus,
- Recherche de groupe dans l'espace spectral,
- Affectation des objets aux groupes.

La mise en œuvre de l'algorithme spectral nécessite une satisfaction aux conditions de notions de groupes qui doit être supérieure ou égale à 2. (Peng Li, 2015)

I.2.3 Algorithmes d'apprentissages mixtes

Un algorithme peut être considéré comme mixte en fonction de la prédiction des résultats qu'il serait possible d'obtenir. Il peut être considéré comme supervisé lorsqu'il est forcé de converger vers un état final précis et un comme non supervisé si on n'a pas besoin de construire un modèle de données d'entraînement au départ pour classifier les données.

i. Analyse des données à partir du Model de Markov

Le modèle de Markov porte le nom de son inventeur Andrei Markov. C'est un système modélisé qui est censé être un processus markovien dans lequel l'information nécessaire à la prédiction d'un état futur n'est pas dépendante du passé, mais plutôt du processus présent. Le modèle de Markov peut être appliqué sous plusieurs configurations et le fait qu'il soit supervisé ou non dépend de la connaissance des modèles de données (Raf, 2012). Le modèle Markov qui est généralement utilisé pour l'intelligence artificielle ou l'apprentissage automatique est le modèle caché de Markov. Sa particularité est due au fait que contrairement à une chaîne normale de Markov, ce sont plutôt les états d'une exécution qui sont connus de l'utilisateur (BINSZTOK, 2007). Le modèle auquel nous nous sommes intéressés dans l'article (Enkhjargal Dorj, 2013) de notre revue de littérature est celui du modèle caché de Markov étant donné que son application se rapproche du domaine d'apprentissage automatique en maintenance. Les grandes étapes de cette technique d'algorithme sont les suivantes :

- Définir un nombre d'états,
- Définir la probabilité initiale $\Pi : [1, K] \rightarrow \mathbb{R}$ qui spécifie la probabilité initiale de chaque état,
- Distribuer des probabilités de transitions $A : [1, K] \rightarrow \mathbb{R}^{[1, K]}$ qui définiront la possibilité de passer d'un état à un autre,
- Distribuer des probabilités d'émission qui spécifie $B : [1, K] \rightarrow \mathbb{R}^{|\Sigma|}$ qui spécifient pour chaque état la probabilité d'émettre un symbole de l'alphabet Σ (ensemble de symboles).

Les objectifs ici sont de calculer les probabilités $P(X|\lambda)$, λ étant donné et de déterminer le chemin I maximisant la probabilité $P(X, I|\lambda)$ (BINSZTOK, 2007). La figure I.9 illustre un exemple d'application du modèle Markov.

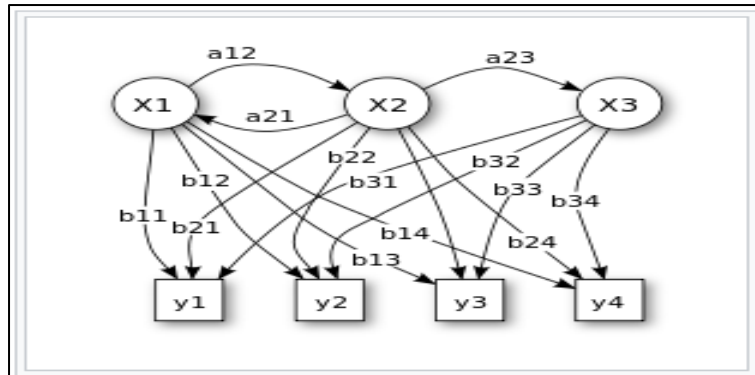


Figure I.9 Illustrant le modèle caché de Markov
Tirée de Jsohel (2013, P. 1)

- X : états cachés,
- y : les variables observées,
- a , probabilités des états de transition (elle dépend de l'état caché précédent),
- b , probabilités émises (elle dépend de l'état caché du même ordre),
- $P(x_1)$ est sans condition,
- $\theta = \{A, B, P(x_1)\}$ m,

Le modèle caché de Markov est une classification basée sur un modèle de calculs probabiliste. Dans l'article (Enkhjargal Dorj, 2013) passé en revue, cette technique est combinée à la notion du bayésien pour effectuer la comparaison des données normales et anormales. Les résultats des études de cet article ont donné une précision d'environ 88 % dans la détection d'anomalie, mais la limite de ces résultats est traduite par le fait que trop d'états masqués peuvent conduire à un modèle trop adapté à une situation spécifique et à de mauvaises performances.

ii. Analyse des données à partir du réseau de neurones

Le réseau de neurones est un modèle probabiliste dont l'algorithme s'inspire du principe de fonctionnement des neurones biologiques. Les réseaux de neurones artificiels peuvent être supervisés ou non supervisés selon le cas où leur modèle converge vers un résultat final précis lorsqu'un motif leur est présenté. Ils sont le plus souvent utilisés pour des systèmes de données dont les analyses à partir de méthodes statistiques ne sont pas suffisantes. Ils sont aussi utilisés

dans des cas où il existe une relation linéaire entre les variables prédictives et les variables prédites (A. Schmitt, 2010). Les réseaux de neurones artificiels sont notamment appliqués pour résoudre des problèmes de classification, de reconnaissances des formes, d'amélioration, de prédiction, etc. (A. Schmitt, 2010). Le principe de fonctionnement d'un réseau de neurones dépend essentiellement de son architecture, de sa complexité (la quantité et les relations entre les neurones), de ses fonctions de transition et d'activation, ainsi que son application (prédiction, catégorisation, reconnaissance de forme, etc.). Un réseau de neurones artificiel est composé par des entrées, des couches intermédiaires, des poids de connexion, des fonctions de combinaison et d'activation et de la sortie. Figure I.10

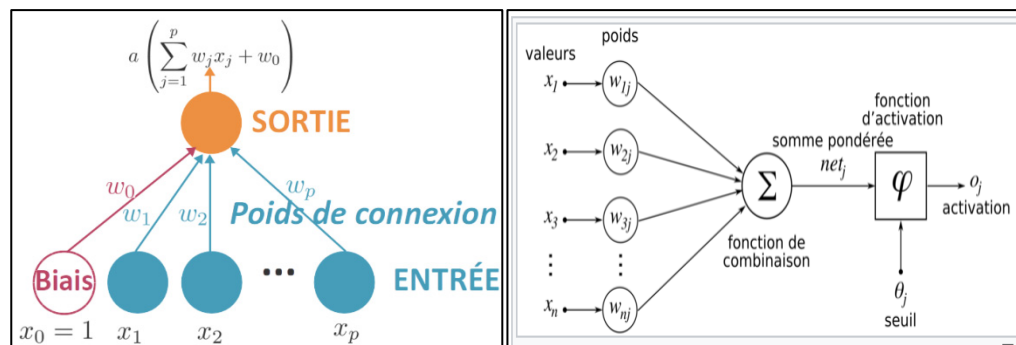


Figure I.10 Composition d'un réseau de neurones
Tirée de Chrislb (2005, P. 1)

Les trois phases nécessaires à l'automatisation d'un réseau de neurones artificiels sont les suivantes :

- La phase d'apprentissage,
- la phase de validation,
- la phase de test.

Le modèle mathématique d'un réseau de neurones pouvant servir au traitement de données peut être estimé par la formule :

$$y = \psi(w, x) + \epsilon \quad (1.31)$$

$y=(y_0, y_1)$ représentant la sortie de réseau obtenu à partir des variables $x=(x_0, \dots, x_{N-1})$ représentant les signaux d'entrées du réseau $\psi(\cdot)$ (Scalart, 2016). Comme différents types de fonction d'activation, nous avons :

- la fonction sigmoïde,
- la fonction tangente hyperbolique,
- la fonction de Heaviside, etc.

L'article (Anvardh Nanduri [M.S. Candidate], 2016) passé en revue comparant le traitement des données à partir du SVM et à partir du réseau de neurones nous présente des résultats intéressants, mais avec un accent particulier sur le temps d'entraînement des données qui peut être relativement long et considéré comme un inconvénient.

1.2.4 Les algorithmes d'apprentissages basés sur une étude statistique non paramétrique

Certaines données d'équipements électroniques ont à la place des données numériques des données qualitatives ou quantitatives. L'apprentissage automatisé statistique est utilisé dans ces cas pour analyser les données dont on ne connaît pas l'état (saines ou endommagées) à l'avance ou lorsque les données ne convergent pas forcément vers un état final précis. Lorsque les données analysées ne suivent pas une distribution statistique connue, on parlera dans ce cas d'une étude statistique non paramétrique.

i. Méthodologie d'analyse séquentielle : test de rapport de probabilité séquentiel

Une analyse séquentielle est une étude statistique dont les échantillons et les règles ne sont pas prédéfinis en avance. Elle permet de confronter l'hypothèse et la réalité et permet aussi de prendre une décision en conséquence. Cette technique est majoritairement utilisée lorsque les données analysées sont d'ordre qualitatif. Le test de rapport de probabilité est l'une des méthodes d'analyse statistique utilisée pour détecter les changements statistiques dans les signaux ayant des perturbations causées par le bruit, donnant ainsi une spécification sur le type et l'heure d'apparition des perturbations. Le principe de fonctionnement du test séquentiel est basé sur un test d'hypothèse ayant la forme générale suivante :

- Une classification basée sur le calcul de probabilités,
- Une détection d'anomalie de procédé,
- L'acceptation ou le rejet de l'hypothèse nulle. Figure I.11,

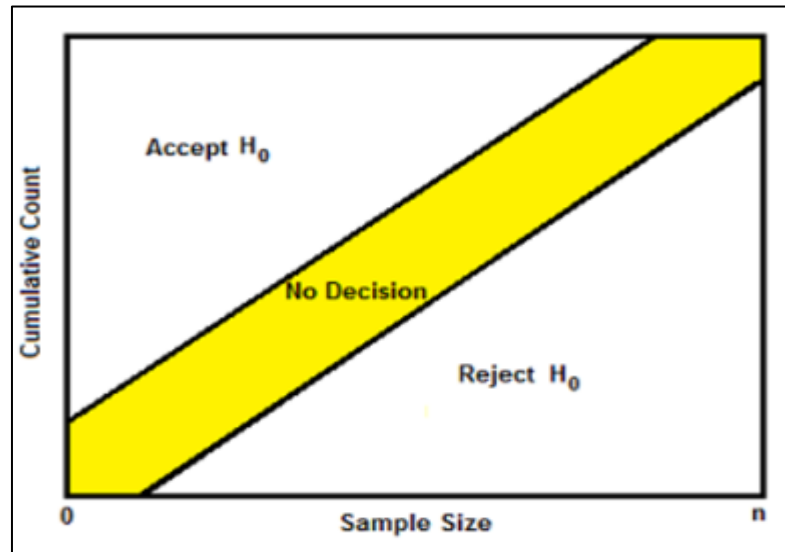


Figure I.11 Acceptation ou rejet de l'hypothèse H_0

$$H_0: p=p_0 \quad H_1: p=p_1 \quad a \approx \log \frac{\beta}{1-\alpha} \text{ et } b \approx \frac{1-\beta}{\alpha} \quad S_i = S_{i-1} + \log A_i \quad (1.32)$$

La règle d'arrêt est basée sur schéma de seuil

Si $a < s_i < b$: on continue la classification des données

Si $s_i > b$: on accepte H_1

Si $s_i < a$: on accepte H_0

α est la probabilité d'accepter H_1 quand H_0 est vraie

β est la probabilité d'accepter H_0 quand H_1 est vraie

$$\log A = \log (f [p_1] : f [p_0]) \quad (1.33)$$

$$P_1 = f (p_1) ; p_0 = f (p_0) \quad (1.34)$$

Le test de rapport de probabilité est une technique d'analyse séquentielle qui a comme avantage l'augmentation de la sensibilité, la détection de fausses alarmes. Il permet aussi la détection rapide de tout point de changement dans le temps et la détection d'anomalies en temps réel, mais a comme inconvénient l'optimalité du test qui ne s'applique qu'aux hypothèses simples.

I.3 Méthodes de classification des données

La classification consiste à regrouper les données similaires en sous-ensemble de la façon la plus simple possible, selon une problématique définie, ce qui permettrait de converger vers une vision globale à l'aide de l'exploration des données. Elle a pour but de simplifier les données en réduisant le nombre de dimensions d'un tableau de données, tout en gardant une représentativité dimensionnelle incluant toutes les caractéristiques essentielles au regroupement des données. La classification des données peut être appliquée selon deux méthodes à savoir : les méthodes de classification supervisée (qui permet de regrouper des objets à partir des variables quantitatives ou qualitatives) et non supervisée ou clustering (qui utilise un échantillon d'apprentissage automatique connu pour l'apprentissage des règles de classement). La classification permet de déterminer à quelle catégorie un objet appartient, ce qui permet ainsi de simplifier le traitement et l'analyse en diminuant le temps de traitement des données. Certaines méthodes de traitement de données citées ci-dessus peuvent aussi être utilisées comme processus de classification des données, quelques exemples de ces méthodes sont les suivantes :

i. Le réseau de neurones (feed-forwarded)

La structure d'un neurone artificiel est constituée d'un ensemble d'entrées ayant chacune un poids différent qui sont combinées grâce à une fonction d'activation pour produire une sortie unique. Le *feed-forwarded* est un réseau de neurones dans lequel l'information est véhiculée de bout en bout uniquement dans un seul sens. Ce type de réseau peut être séparé en deux sous-catégories qui sont, le perceptron simple et le perceptron multicouches. Le perceptron simple qui va être utilisé comme algorithme de classification linéaire dans lequel les deux couches uniques du réseau sont reliées à ce qui conduirait à la construction d'une matrice unique de poids. Le réseau de neurones est le plus souvent utilisé pour la classification dans certains

apprentissages supervisés, mais nécessite un étiquetage préalable des données. C'est un algorithme qui permet de traiter les données de façon autonome en faisant transiter chaque entrée de données par les phases d'apprentissage, de test et de regroupement, comme on peut le voir sur la figure I.12.

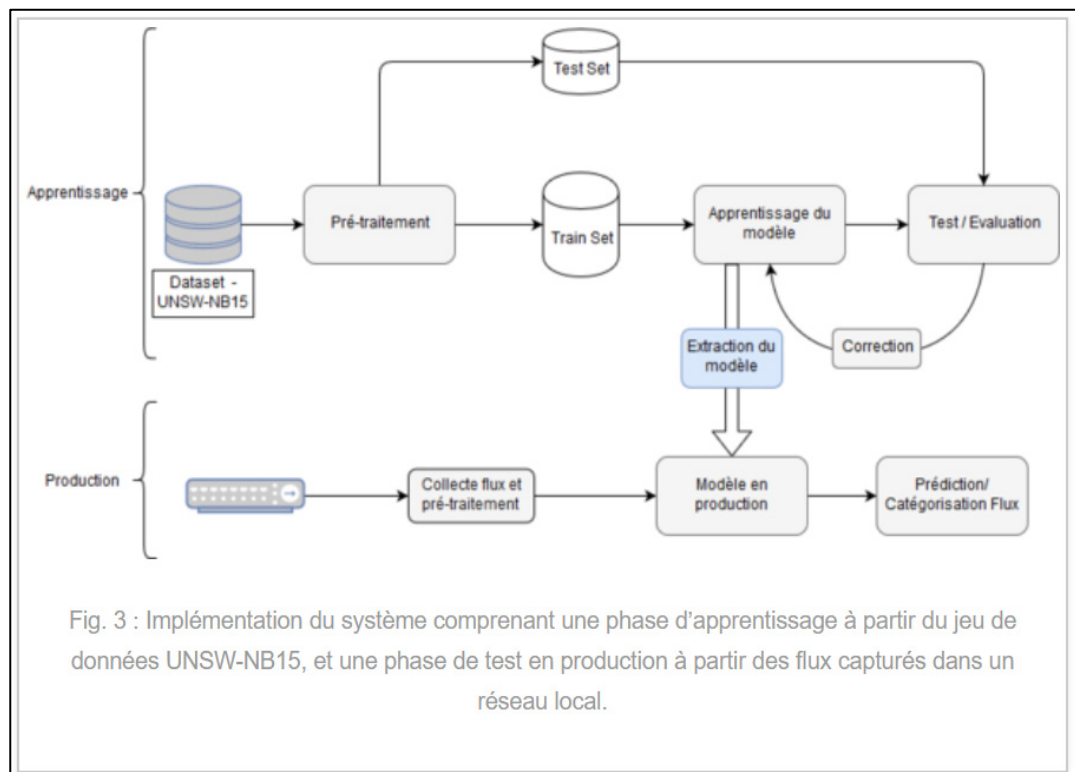


Figure I.12 Exemple de processus de traitements des données du réseau de neurones.

Tirée de <https://www.researchgate.net/> (2022)

Les données de maintenance passent par une étape de prétraitement qui consiste à nettoyer, corriger les erreurs sur les données pour qu'elles puissent être traitées plus tard par des algorithmes de classification. Une fois prétraitées, ces données vont transiter en même temps vers les circuits d'entraînement et de test (comme on peut le voir sur la figure I.12 ci-dessus) pour servir au niveau de l'apprentissage du modèle après évaluation et correction pour certains cas de données. Une fois le modèle de données extrait, il sera utilisé plus tard comme modèle

de production pour le nouveau flux de données qui entrent, afin de pouvoir effectuer des prédictions ou des catégorisations au niveau de la maintenance. Les avantages du réseau de neurones utilisé comme algorithmes de classification sont :

- La détection d'anomalies à temps réel,
- La non-réduction des dimensions,
- La sensibilité aux défaillances à court terme.

Cependant, l'un des inconvénients est que le temps d'entraînement pour avoir un modèle de données peut être relativement long.

ii. Le test de rapport de probabilité séquentiel

C'est un test d'hypothèses binaires qui permet d'analyser de façon séquentielle l'observation d'un processus pour décider si oui ou non, son comportement serait normal (*Early Detection of Signal and Process Anomalies in Enterprise Computing Systems* Kenny Gross; Wendy Lu [2002].). Cette méthode de classification consisterait à définir des hypothèses, qui seront ensuite acceptées ou rejetées en fonction de la valeur obtenue en calculant les probabilités sur les données de maintenance. Une des techniques combinant la probabilité séquentielle et la classification est la méthode ensembliste. La méthode ensembliste est un modèle probabiliste séquentiel actif, qui va définir le processus de décision séquentiel qui sera en mesure de sélectionner de façon judicieuse les classifieurs adéquats pour l'exemple en cours de classification, selon les résultats des précédentes classifications. (Étude de la classification dans un très grand nombre de catégories. Raphaël Puget)

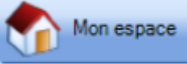
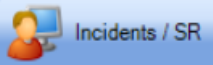
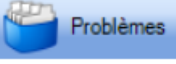
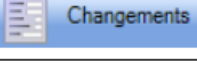
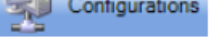
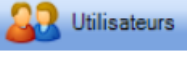
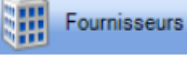
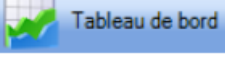
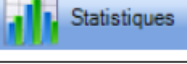
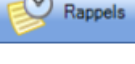
Comme on l'a vu ci-dessus sur la figure I.11, pour certains cas de types d'hypothèses, on ne saurait prendre des décisions. Les avantages de cette technique sont les suivantes :

- L'augmentation de la sensibilité, détection de fausses alarmes,
- La détection rapide de tout point de changement dans le temps,
- La détection d'anomalie à temps réel.


Un des inconvénients de cette technique est que l'optimalité du test ne s'applique qu'aux hypothèses simples. Comme nous montre l'étude au niveau de l'article (*Early Detection of Signal and Process Anomalies in Enterprise Computing Systems* Kenny Gross; Wendy Lu [2002].), cette technique n'est pas infallible et peut donner des résultats erronés si les données contiennent du bruit ou lorsqu'une légère dérive est notée avant une situation catastrophique.

ANNEXE II MODULES OCTOPUS

Tableau-A II-1 Modules octopus

Module	Menu ou accès rapides	
Mon espace	 Mon espace	Ctrl + F2 Menu <i>Fichier</i> -> <i>Mon espace</i>
Gestion des incidents / SR	 Incidents / SR	F2 Menu <i>Fichier</i> > <i>Gestions des incidents / SR</i>
Gestion des problèmes	 Problèmes	Menu <i>Fichier</i> > <i>Gestions des problèmes</i>
Gestion des changements	 Changements	Menu <i>Fichier</i> > <i>Gestions des changements</i>
Gestion des configurations	 Configurations	Menu <i>Fichier</i> > <i>Gestions des configurations</i>
Gestion des utilisateurs	 Utilisateurs	F3 Menu <i>Fichier</i> > <i>Gestions des utilisateurs</i>
Gestion des fournisseurs et des contrats	 Fournisseurs	Menu <i>Fichier</i> > <i>Gestions des fournisseurs</i>
Tableau de bord	 Tableau de bord	F9 Menu <i>Fichier</i> > <i>Tableau de bord</i>
Statistiques	 Statistiques	Menu <i>Fichier</i> > <i>Statistiques</i>
Rappels	 Rappels	F8 Menu <i>Fichier</i> -> <i>Mes rappels</i>
Gestion des pièces		Menu <i>Fichier</i> > <i>Gestion des pièces</i>
Gestion des événements		Menu <i>Fichier</i> > <i>Gestion des événements</i>
Calendrier		F11 Menu <i>Fichier</i> > <i>Calendrier</i>
Rapports		Menu <i>Fichier</i> > <i>Rapports</i>

ANNEXE III FORMULAIRE DE VÉTUSTÉ

Centre intégré de santé et de services sociaux de la Montérégie-Est Québec 	
DÉCLARATION DE VÉTUSTÉ D'UN ÉQUIPEMENT MÉDICAL	
Date de déclaration :	
Destinataire	
Site : Faire une sélection	▼
Direction : Faire une sélection	▼
Service : Faire une sélection	▼
Nom du chef de service :	Téléphone : 1 514-267-9634 ▼ Poste :
Nom du requérant ayant fait la demande de service :	
Équipement	
Nom de l'équipement : (Faire une sélection)	▼
Marque :	Numéro de série :
Modèle :	Numéro d'inventaire :
Date d'achat :	Valeur de référence : 0 \$
Impact budgétaire	
Coût d'achat :	Année théorique du remplacement : N/A ▼
Coût global de l'entretien :	Durée vie théorique :
Estimation de réparation :	Quantité pour vétusté de Parc :
Coût global final : \$ 0,00	Valeur du parc : \$ 0
État de la situation	
État de l'équipement : Faire une sélection	▼
Description du problème :	
Demande de prêt : Non ▼	Date : Nom du fournisseur :
Justifications / Joindre les documents pertinents (lettre de fin de vie, évaluation, etc.)	
L'équipement est irréparable pour la raison suivante : Faire une sélection	▼
Autre justification : n/a	▼
Commentaires supplémentaires :	
Note : tout équipement dont la valeur est inférieure à 1000 \$ doit être remplacé via le budget d'exploitation du département et n'est pas admissible au PCEM. Toutefois, un parc d'une valeur de plus de 1000 \$ sera considéré.	
<input type="checkbox"/> Remplacement urgent / Rupture de service	
<input type="checkbox"/> Remplacement et prévoir le renouvellement en N/A ▼	
Équipement évalué par ce technicien GBM : Faire une sélection	▼ Date :
Chef service – Entretien équipements médicaux :	Date :
<small>Révisé juillet 2021</small>	

ANNEXE IV FICHE DE VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Tableau-A IV-2 FICHE DE VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypothèses	Contributions	Échantillon/Contexte
<p>Quels corpus de littérature/domaines de recherche sont pertinents pour le projet ?</p> <ul style="list-style-type: none"> – La maintenance 4.0 – Les algorithmes intelligents – La maturité numérique <p>Quel est l'objectif principal de chaque corpus littéraire ?</p> <ul style="list-style-type: none"> – La maintenance 4.0 : Établir des méthodes et un processus remplaçable grâce auquel on pourrait préparer un système de maintenance à la transition et à l'installation d'une maintenance 4.0 	<p>Quelles preuves existent dans la littérature ? (Constats/résultats,</p> <p>Conclusions, recommandations, propositions, hypothèses, Relations, etc.)</p> <ul style="list-style-type: none"> – En cours <p>Quel(s) problème(s) ou thème(s) sont observables dans les recherches antérieures ?</p> <ul style="list-style-type: none"> – La maintenance 4.0 – Les algorithmes intelligents – La maturité numérique 	<p>Quelles sont les questions de recherche ?</p> <ul style="list-style-type: none"> – Quelle méthodologie suivre pour l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0 ? – comment améliorer les processus et la mobilisation ressource d'une organisation à partir de la maintenance 4.0 ? – Quelles méthodes ou processus utiliser pour effectuer le choix d'un algorithme intelligent de traitement des données de maintenance d'une organisation ? 	<p>Quels sont les apports prévus de la recherche ?</p> <p>Nos apports dans la recherche seront de regrouper et d'établir un ensemble d'outils technologiques et méthodologiques pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Nous guider dans le choix des algorithmes intelligents – Mettre sur pied des procédures pouvant guider dans l'implantation d'un modèle de maintenance 4.0 	<p>Quels échantillons et méthodes d'échantillonnage seront utilisés ?</p> <p>Ne s'applique pas</p> <p>Le contexte de la recherche jouera-t-il un rôle important ?</p> <p>Oui dans notre cas ça sera celui de la maintenance de station d'épurations des eaux usées de Montréal et de la maintenance biomédicale de l'hôpital honoré Mercier.</p>

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypothèses	Contributions	Échantillon/Contexte
<p>– Les algorithmes intelligents :</p> <p>Trouver une méthodologie qui permettrait de guider le choix d'un ou des algorithmes intelligents pour un modèle de maintenance 4.0.</p> <p>– La maturité numérique : s'inspirer des travaux de recherche existants sur les indicateurs de maturité d'une organisation afin de sélectionner les outils adéquats et pertinents d'évaluation de la maturité numérique de la maintenance d'une organisation.</p>	<p>Y a-t-il une (des) lacune(s) et/ou un (des) problème(s) ?</p> <p>– La maintenance 4.0</p> <p>Lacune : Une méthodologie qui indique comment préparer et mettre sur pied un plan d'action pour la maintenance 4.0 dans une organisation.</p> <p>– Les algorithmes intelligents</p> <p>Lacune : Une élaboration des questions qu'on pourrait se poser pour effectuer les choix des algorithmes intelligents qui seront utilisés pour la maintenance 4.0 d'une organisation.</p>	<p>Existe-t-il des hypothèses provisoires ?</p> <p>Serait-il possible d'optimiser les processus et la mobilisation des ressources d'une organisation à partir de la maintenance 4.0 ?</p> <p>De façon qualitative on s'attend à ce que les avantages soient plus importants que les inconvénients</p>	<p>– proposer des solutions de planification d'une feuille de route servant à implanter un modèle de maintenance 4.0 qui permettra d'optimiser la qualité des produits et systèmes.</p> <p>Quel type de cotisation ? (Pratique, empirique, théorique, méthodologique, philosophique)</p> <p>On aura une cotisation de type méthodologique.</p>	<p>Ces deux contextes nous permettront d'avoir des cas pratiques de maintenance dont on pourrait observer les méthodes de travail, les procédures, les ressources et les outils technologiques utilisés.</p> <p>Si oui, quelles sont les caractéristiques distinctives du contexte ?</p> <p>Ces contextes nous permettront de ne pas proposer des solutions, des outils et des méthodes basées sur des expériences non vécues ou expérimentées.</p>

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypothèses	Contributions	Échantillon/Contexte
<p data-bbox="297 369 513 470">Quels sont les principaux articles/études ?</p> <p data-bbox="297 512 464 653">- Physics-of-Failure Approach to PHM</p> <p data-bbox="297 695 464 762">– Un résumé d'article</p> <p data-bbox="297 804 500 1125">- A NEW TOOL FOR ASSESSING MATURITY ALIGNMENT: THE ENTERPRISE MATURITY MATRIX</p> <p data-bbox="297 1167 427 1276">Cadre de recherche (Acatech)</p>	<p data-bbox="529 401 756 615">Quels sont les couts ou les risques de ne pas combler l'écart/Problème ?</p> <p data-bbox="529 657 756 1087">Ne pas combler le problème ou rattraper en ce qui concerne les avancées en maintenance 4.0, maturité numérique et algorithmes intelligents pour causer les pertes suivantes :</p> <ul data-bbox="529 1129 756 1717" style="list-style-type: none"> – Temps – D'argent – Baisse de la qualité des services et produits – Une mauvaise visibilité – Difficultés d'effectuer et d'assurer une veille technologique. – Une mauvaise adaptabilité – Compétitivité 	<p data-bbox="781 436 1016 615">Quelle est la valeur d'enquêter sur les questions/hypothèses ?</p> <p data-bbox="781 657 1016 1234">Les questions de recherches nous permettront de savoir quelle méthodologie utiliser pour établir un plan d'action d'implantation d'une maintenance 4.0 afin d'améliorer l'exploitation des ressources et les processus de maintenance</p> <p data-bbox="781 1276 1016 1528">Avoir un petit référentiel à partir duquel on peut démarrer l'implantation d'une maintenance 4.0</p>	<p data-bbox="1044 401 1198 653">Quelle valeur la recherche apportera-t-elle aux parties prenantes ?</p> <p data-bbox="1044 695 1214 873">La recherche permettra aux parties prenantes de :</p> <ul data-bbox="1044 915 1214 1860" style="list-style-type: none"> – Savoir quelles questions se poser pour choisir un algorithme intelligent de traitement des données de maintenance – D'avoir un cheminement qui leur permettrait de savoir les étapes à suivre et les conditions à réunir avant et après l'implémentation d'une maintenance 4.0 <p data-bbox="1044 1860 1214 1919">Contributio n</p>	

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypothèses	Contributions	Échantillon/Contexte
<p>Existe-t-il des sous-domaines identifiables ou des constellations d'études dans le corps de la littérature ?</p> <p>Oui en occurrence</p> <ul style="list-style-type: none"> - le choix des index de maturité - les algorithmes de prétraitement, de traitement et d'analyse des données de maintenance. - l'internet des objets 	<p>Existe-t-il des liens potentiels entre les corps de la littérature menant à de nouveaux enjeux, des thèmes, une lacune ou un problème ?</p> <p>D'après la revue de littérature effectuée, on constate que plus la plupart des articles analysés se sont focalisés sur l'implémentation d'une maintenance 4.0 (à partir intelligents) sur les équipements ou des modules électroniques ;</p>			

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypothèses	Contributions	Échantillon/Contexte
<p data-bbox="298 401 509 982">Quelles sont les caractéristiques de chaque corpus littéraire (grand ou petite, bien établie ou nouvellement émergente, universitaire ou non universitaire, de la même discipline/disciplines différentes ?)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="298 1024 493 1199">– La maintenance 4.0 (nouvellement émergente) <li data-bbox="298 1241 451 1381">– Les algorithmes intelligents (grand) <li data-bbox="298 1423 500 1528">– La maturité numérique (pas harmonisé) 	<p data-bbox="532 474 756 1493">Mais ils ne se sont pas très souvent penchés sur l'étude de façon globale de la maintenance de l'organisation pour définir un plan d'action de l'implémentation d'une maintenance 4.0. Comme on peut le voir dans les conclusions de certains de ces articles, l'environnement de maintenance dans lequel se trouve un système pourrait exercer une influence sur la maintenance 4.0 qu'on pourrait implémenter sur ce système.</p>			

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypothèses	Contributions	Échantillon/Contexte
<p data-bbox="152 365 365 506">Quelle est l'importance de chaque corpus littéraire ?</p> <p data-bbox="152 548 347 905">– La maintenance 4.0 Réduction du temps de travail, des couts, amélioration service, autonomie des services</p> <p data-bbox="152 947 358 1451">– Les algorithmes intelligents de traitement et d'analyse des données de maintenance pour améliorer les services et réduire les couts Détection d'anomalie et prédiction du RUL.</p> <p data-bbox="152 1493 365 1923">– La maturité numérique Observer les indicateurs de maturité pour s'assurer qu'ils sont adéquats et évoluent selon l'état actuel de l'organisation et les prévisions.</p>				

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypothèses		Échantillon/Contexte Contributions
				<p>Méthodologie/Design/Méthodes</p> <p>Quelle est la méthodologie ou la conception de l'étude ?</p> <p>Notre méthodologie consiste à étudier de façon méthodique les aspects importants de la maintenance existante :</p> <ul style="list-style-type: none"> – L'informatisation – la connectivité – la visibilité – la transparence <p>Afin de déterminer les aspects à améliorer et les outils à développer ou à exploiter pour implanter un modèle de maintenance 4.0 permettant d'assurer la prédictibilité et l'adaptation facile du nouveau système de maintenance grâce aux données de maintenance.</p> <p>Quels sont les principes clés/objectifs/critères de qualité de la méthodologie/conception ?</p> <p>Notre première mission à la station d'épuration des eaux usées de Montréal consistait à effectuer un audit et à leur proposer un plan d'action pour exploiter les données de maintenance, les algorithmes intelligents et l'internet des objets afin d'améliorer la santé des leurs infrastructures</p>

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypothèses	Contributions Échantillon/ Contexte
			<p>Notre objectif a Honoré-Mercier était d'établir une feuille de route pour la conduite du projet de maintenance 4.0, des études préliminaires jusqu'à l'installation d'une maintenance prédictive basée sur des algorithmes d'intelligence artificielle exploitant des données de maintenance existantes.</p> <p>La méthodologie/conception est-elle bien établie ou relativement unique dans votre discipline/domaine ?</p> <p>Case study pour amorcer un projet de maintenance 4.0</p> <p>La méthodologie utilisée a été établie par nous-mêmes.</p> <p>Quelles méthodes spécifiques de collecte et d'analyse des données seront utilisées ?</p> <p>Les méthodes de collectes seront basées sur les audits, les observations faites pendant les visites et les interventions en tant que personnel technique</p> <p>Les analyses seront faites par l'entremise des comparaisons des constats de réalité observés aux bonnes pratiques de maintenance.</p> <p>Quelles sont les principales caractéristiques ou forces de chaque méthode ?</p>

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypothèses	Contributions Échantillon/ Contexte
			<p>Les audits, les observations lors des visites et les interventions nous permettent d'observer à temps réel les pratiques et d'explorer le système de maintenance existant ; ceci nous permettant d'avoir une meilleure visibilité.</p> <p>Comment les méthodes vont-elles se compléter ?</p> <p>Les audits nous permettront de poser nos questions aux principaux concernés.</p> <p>Les observations nous permettront de faire nos vérifications</p> <p>Les interventions en tant que personnel technique nous permettront d'expérimenter les processus, ressources et outils du système de maintenance pour effectuer une meilleure analyse basée sur nos propres expériences.</p>

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypothèses	Contributions Échantillon/ Contexte
		<p data-bbox="719 436 979 468">Théorie & Concepts</p> <p data-bbox="643 548 1317 615">Quel rôle la théorie ou les concepts joueront-ils dans la recherche ?</p> <p data-bbox="643 657 1325 871">La revue de littérature nous permettra d'explorer les différentes catégories d'algorithmes intelligents qui existent, d'étudier les pistes des travaux existant sur l'amélioration de la maintenance d'un système grâce aux algorithmes intelligents et d'établir un cadre de référence de maturité d'une organisation.</p> <p data-bbox="643 913 1284 980">Quelles idées/concepts/modèles/cadres théoriques seront utilisées, développées ou testées ?</p> <p data-bbox="643 1022 1308 1125">Les concepts théoriques qui vont être utilisés seront ceux provenant de la synthèse de la revue de littérature effectuée.</p> <p data-bbox="643 1167 1276 1270">Qu'est-ce que la théorie signifie/qu'est-ce qui constitue la théorie dans votre discipline ou votre domaine ?</p> <p data-bbox="643 1312 1321 1526">La théorie de notre recherche se limitera uniquement à la revue de littérature : – L'étude des maintenances effectuées grâce aux algorithmes intelligents – L'étude des critères ou indices de maturité d'une organisation</p>	

Littératures	Observations & Arguments	Questions de recherche/Hypo thèses	Contributions	Échantillon/ Contexte
<p>Problème/Phénomènes</p> <p>Quels sont les principaux phénomènes et sous-phénomènes de la recherche ?</p> <p>Principal phénomène de recherche : Définir une méthodologie d’implantation d’une maintenance 4.0</p> <p>Les sous-phénomènes de recherche,</p> <ul style="list-style-type: none"> – L’analyse de la maintenance existante – L’analyse de la maturité numérique – Le choix des algorithmes de maintenance intelligents – La réalisation d’une feuille de route pour définir les étapes d’implantation d’un modèle de maintenance 4.0 ; l’ordre de réalisation et le chevauchement de ces étapes. <p>La recherche implique-t-elle un problème du monde réel et si oui, quel est-il ?</p> <p>Oui elle implique un problème du monde qui est celui de savoir quelle méthodologie utiliser pour amorcer et implanter un modèle de maintenance 4.0 afin d’optimiser la maintenance d’une organisation.</p> <p>Qui sont les principaux acteurs de la recherche ?</p> <p>Mon encadreur, moi, le personnel des principales organisations utilisées dans les cas pratiques.</p>		<p>Hypothèses/Paradigme</p> <p>La recherche est-elle basée sur des hypothèses philosophiques particulières ?</p> <p>Non</p> <p>La recherche opère-t-elle dans un paradigme de recherche spécifique ?</p> <p>La recherche opère dans un cadre de recherche liée à l’industrie 4.0 ; la maintenance 4.0 et l’internet des objets.</p>		

LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. Schmitt, B. L. B., M.-M. Corsini, C. Lafond et J. Bruzek. (2010). Les réseaux de neurones artificiels. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 13. Retrieved from <<http://journals.openedition.org/bmsap/4463>>
- Afef Saihi, M. B.-D. (2022). A Survey of the Underlying Success Factors of Maintenance Digital Transformation. *ScienceDirect*, 6. Consulté le Decembre 10, 2022, sur www.sciencedirect.com
- Afshari, L. P. (2016). *How to Increase Organizational Commitment through Transactional Leadership*. (L. & Development, Éd.) doi:DOI: 10.1108/LODJ-08-2014-0148
- Allemagne: acatech – National Academy of Science and Engineering, 2017. Consulté le novembre 1, 2022, sur <www.acatech.de/publikationen>
- Al-Najjar, B. (2007). The lack of maintenance and not maintenance which costs: A model to describe and quantify the impact of vibration-based maintenance on company's business. *International Journal of Production Economics*. 260-273.
- Al-Najjar, B. (2015). Maint CPS project report
- an Lesniaka, R. H. (2019). Computer Aided Detection of Breast Masses in Mammography using Support Vector Machine Classification. 8.
- Anvardh Nanduri (M.S. Candidate), L. S. P. D. (2016). Anomaly detection in aircraft data using recurrent neural networks (rnn). 9. doi:10.1109
- Basim Al-Najjar, H. A. (2018, Novembre). Maintenance 4.0 to fulfil the demands of Industry 4.0 and Factory of the Future. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 20-31. doi:<https://doi.org/10.9790/9622-0811022031>
- Bauernhansel, T. J. (2016). WGPStandpunkt Industrie 4.0, Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik Wgp. Consulté le Decembre 06, 2022

- Bilge, P. E. (2017). Mapping and Integrating Value Creation Factors with Life-cycle Stages for Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, 15.
- Boos, W. M. (2011). *Grundlagen des Managements*. Berlin, Heidelberg, Allemagne: Springer-Verlag (VDI-Buch). Consulté le Novembre 1, 2022
- BOUGUERRA, A. H. (2022). *Analyse du réseau de logistique inverse basée sur les données massives*. Retrieved Décembre 13, 2022
- Burchett, V. M. (1999). Applying a Risk Management Process (RMP) to manage cost risk for an EHV transmission line project. *International Journal of Project Management*, 13. Retrieved Aout 12, 2022
- CEFRIO. (2018). Les 6 clés de l'adoption. (p. Ednet, éd.) *Un outil de référence aux bonnes pratiques de gestion d'un projet numérique*, p. 11. Consulté le mai 19, 2022, sur www.cefrio.qc.ca
- Clustering par fusion floue de données appliquées pour la segmentation d'images IRM cérébrales. 12. Retrieved from <http://ceur-ws.org/Vol-547/87.pdf>
- Coline TALON, E. D. (2019). ANALYSIS OF CLASSIFICATION MACHINE LEARNING ALGORITHMS ON A USE CASE FROM THE NUCLEAR INDUSTRY. *IMdR*, 08.
- (Ed.), a. (2016). *Kompetenzen für Industrie 4.0. Qualifizierungsbedarfe und Lösungsansätze*. Munich. Consulté le Juin 18, 2022
- Emanuel Albu, C. P. (2010, Octobre 09). A new tool for assessing maturity alignment: the enterprise maturity matrix. *Performance Improvement*, vol. 49(no. 9), 13. doi:DOI: 10.1002/pfi.20179
- Francoeur, D. (2010). Machines à vecteurs de support. *CAMUS*, 19. Retrieved from <http://camus.math.usherbrooke.ca/revue/revue1/article2.pdf>

- Galar D, S. D. (2016). Maintenance Performance Measurement and Management. *6th International Conference On Maintenance Performance Measurement and Management*, , (p. 204). Lulea.
- Ghasemzadeh, N. A. (1999). An integrated framework for project portfolio selection. *International Journal of Project Management*, 10.
- Günther Schuh, R. A. (2017). *Industrie 4,0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies (acatech STUDY)*. Munich : Herbert Utz Verlag,
- Guofeng Wang n, C. L. (2012). Clustering diagnosis of rolling element bearing fault based on integrated Autoregressive/Autoregressive Conditional Heteroscedasticity model. *Journal of Sound and Vibration*, 09.
- Hamilton, A. (1998). Management by Projects Achieving Success in a Changing World. *International Journal of Project Management*, 2. Retrieved Juin 03, 2022
- Hyunseok Oh1, M. H. (2018). Sensor Systems for PHM. 22. Retrieved Novembre 20, 2022
- Jovanovic, P. (1999). Application of sensitivity analysis in investment project evaluation under uncertainty and risk. *International Journal of Project Management*, 6.
- Jing Tian1, M. H. (2014). Anomaly Detection Using Self-Organizing Maps-Based K-Nearest Neighbor Algorithm. *Center for Advanced Life Cycle Engineering*, 09.
- Jovanovic, P. (1999). Application of sensitivity analysis in investment project evaluation under uncertainty and risk. *International Journal of Project Management*, 6.
- Jameson, M. K. (2018). Machine Learning: Fundamentals. 25.
- Kang, M. G. (2018). Prognostics and Health Management of Electronics. *2018 John Wiley and Sons Ltd*, 54. Retrieved juin 09, 2021
- Kang, M. G. (2020). Introduction to PHM. 37. Consulté le 18 aout 2022

- Kaoutar, M. k. (2017) *Implémentation du clustering spectral & k-means :étude comparative*. SAIDA Moulay Tahar. Dr Uni, Retrieved from https://pmb.univsaida.dz/butecopac/doc_num.php?explnum_id=543
- Love, J. S. (2001). *The Organisation of Innovation: Collaboration, Cooperation and Multifunctional Groups in UK and German Manufacturing*. Cambridge Journal of Economics. Consulté le decembre 01, 2022
- Luca Silvestri a, A. F. (2020). Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. (elsevier, Ed.) *ScienceDirect*, 16. Retrieved Novembre 08, 2023, from www.elsevier.com/locate/compind
- Maletic, D. (2014). Therole of maintenance in improving company"s competitiveness and profitability: A case study in a textile company. *Journalof Manufacturing Technology Management*, 441–456.
- Małgorzata Jasiulewicz - Kaczmarek, A. G. (2019). Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing – an Overview. (E. Ltd, Ed.) *nceDirect ScienceDirect*(+48 500-007-701), 12. Retrieved 12 01, 2023, from www.sciencedirect.com
- Marcus Bengtssona, b. G. (2018). On the importance of combining “the new” with “the old” – One important prerequisite for maintenance in Industry 4.0. *ScienceDirect*, 8. Retrieved Novembre 15, 2023, from www.sciencedirect.com
- McGrath, R. G. (2012). *How the Growth Outliers Do It*. Harvard Business Review. Consulté le Octobre 27, 2022
- Menye, J.-B. (2009). *Validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception d'un système multi-composants*.
- Mohamed, C. S. (1999). Criteria of project success: an exploratory re-examination. *International Journal of Project Management* , Vol. 17(No. 4), 6. Consulté le Novembre 30, 2022

- Mouysset, S. (2011). *Contributions à l'étude de la classification spectrale et applications*. (Doctorat). Université de Toulouse Retrieved from <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00573433/document>>
- Myint, D. B. (1999). Time, cost and quality trade-off in project management: a case study. *International Journal of Project Management*, 8. Retrieved Décembre 09, 2021
- OpenClassrooms. (2020). Entraînez un réseau de neurones simple. Retrieved from <<https://openclassrooms.com/fr/courses/4470406-utilisez-des-modeles-supervises-non-lineaires/4730716-entraenez-un-reseau-de-neurones-simple>>
- Peng Li, J. E., Oliver Niggemann. (2015). Data Driven Condition Monitoring of Wind Power Plants Using Cluster Analysis. 6. doi:10.1109
- Pesqueux, Y. (2020). *La gestion du changement*. Paris, France: hal Open Science. doi:halshs-02876592
- Peter Sandborn¹, C. W. (2018). PHM Cost and Return on Investment. 40.
- Piero Baraldia, F. D. M., Marco Rigamontia, Enrico Zioa,b, Redouane, & Seraouic. (2014). Transients Analysis of a Nuclear Power Plant Component for Fault Diagnosis. 7.
- Q. Peter He, J. W. (2007). Fault Detection Using the k-Nearest Neighbor Rule for Semiconductor Manufacturing Processes. 2010.
- Québec. (2020). Fiche terminologique. 1. Retrieved from <http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26557645>
- Radovic, M., Ghalwash, M., Filipovic, N., & Obradovic, Z. (2017). Minimum redundancy maximum relevance feature selection approach for temporal gene expression data. *BMC Bioinformatics*, 18(1), 9. doi:10.1186/s12859-016-1423-9
- Rioux, S. (2020, 2020). *Le nouveau processus de maintenance de Fred*. Retrieved from <<https://www.andromediatech.com/nouveau-processus-maintenance/>>

- Rødseth H, S. P. (2017). Deep digital maintenance, *Adv.* 299–310.
- Sankararaman, S. (2018). Uncertainty Representation, Quantification, and Management in Prognostics. 28.
- Sergio Ram´irez-Gallego, I. I.-R.-C.-B. (2016). *Fast-mRMR: Fast Minimum Redundancy Maximum Relevance Algorithm for High-Dimensional Big Data*. INTERNATIONAL JOURNAL OF INTELLIGENT SYSTEMS. doi:DOI 10.1002/int.21833
- Scalart, P. (2016). Introduction au Data Mining Réseaux de neurones. 54. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/317267407_Introduction_au_Data_Mining_les_reseaux_de_neurones_Devoir_Maison_201415_Cours_Master_Data_Mining_-_an_Introduction-_Year_201617_Master_Classes_Project>
- Settouti, N. (2011). Renforcement de l'apprentissage structurel pour la reconnaissance du diabète. 11-12. Retrieved from <<https://hal.inria.fr/inria00605627/document>>
- Su, M.-Y. (2011). Real-time anomaly detection systems for Denial-of-Service attacks by weighted k-nearest-neighbor classifiers. *ScienceDirect*, 07.
- Taherdoost, H. (2017). A review of technology acceptance and adoption models and théories. *Science Direct*, 8. Retrieved Aout 15, 2021, from www.sciencedirect.com
- Thamo Sutharssan1, S. S. (2015). Prognostic and health management for engineering systems: a review of the ata-driven approach and algorithms. *The Journal of Engineering*, 9.
- Tian, M. K. (2018). Machine Learning: Data Pre-processing. 20.
- Wateridge, J. (1999). The role of configuration management in the development and management of Information Systems/Technology (IS/IT) projects. *International Journal of Project Management*, 5. Retrieved Janvier 01, 2022

Wibowo, M. P. (2019). Technology Acceptance Models and Theories in Library and Information Science Research. *Library Philosophy and Practice*, 15. Retrieved Decembre 12, 2022, from <https://digitalcommons.unl.edu/libphilprac>

Wikipédia. (2020a). Partitionnement spectral. Retrieved from https://fr.wikipedia.org/wiki/Partitionnement_spectral#Partitionnement_des_donn%C3%A9es_dans_l'espace_spectral

Wikipédia. (2020 b, 30 septembre 2020). Réseau de neurones artificiels. Retrieved from https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_neurones_artificiels

William K L Chan, F. K. (1999). Managing construction projects in China—the transitional period in the millennium. *International Journal of Project Management*, 7. Retrieved Avril 4, 2022

Xiaohang Jin, E. W. M. M., L. L. Cheng and Michael Pecht. (2012). Health Monit

XIONG Long, M. H.-D.-Z.-X.-W. (2011). Anomaly Detection of Spacecraft Based on Least Squares Support Vector Machine. 06.

Yu, W. Y. (2013). On Accurate and Reliable Anomaly Detection for Gas Turbine Combustors: A Deep Learning Approach. 08.

ZWINGMANN, X. (2005). *MODÈLE D'ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ ET DE LA MAINTENABILITÉ AU STADE DE LA CONCEPTION*. These, Université de Laval, Laval. Retrieved Janvier 02, 2023