

Démarche d'implantation progressive de la maintenance 4.0

par

Robert VADEBONCOEUR

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA GESTION L'INNOVATION

MONTRÉAL, LE 11 NOVEMBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Robert Vadeboncoeur, 2022



Cette licence [Creative Commons](#) 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. Mickaël Gardoni, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

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

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

LE 4 OCTOBRE 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS



Faire un enfant,
c'est un projet

En faire un adulte,
c'est de la maintenance

REMERCIEMENTS

Revenir à l'école, après 31 ans de vie professionnelle bien remplie, fut un défi fascinant.

J'aimerais, tout d'abord, remercier M. Michel Rioux, mon directeur de maîtrise et partenaire professionnel depuis plus de 20 ans, de son accompagnement et nos discussions, ainsi que le corps professoral de l'ÉTS pour leurs enseignements, compétences et disponibilités.

J'aimerais aussi remercier mes enfants et mes beaux-enfants de leurs encouragements, nos petits-enfants de porter notre avenir, ma mère de mes fondations et une promesse et mes consœurs/confrères pour leurs grandes compétences et soutien,

Enfin, je tiens à souligner l'apport de Monique, conjointe et muse, de son soutien et de sa patience lors de mes longues heures d'isolement dans mon bureau.

Robert Vadeboncoeur

Démarche d'implantation progressive de la maintenance 4.0

Robert VADEBONCOEUR

RÉSUMÉ

De nos jours, en plus des coûts directement impliqués, les enjeux de la fonction maintenance sont de plus en plus critiques pour l'entreprise. Bien que prometteuse et attrayante l'intérêt, la démarche de maintenance 4.0 reçoit un accueil mitigé en entreprise. Environ 20 % des entreprises s'attendent à mettre en œuvre des solutions à grande échelle d'ici 2022. Leurs dirigeants affirment que l'adoption de solutions IIoT pose de nombreux défis tant du point de vue des ressources humaines, des risques financiers et de la technologie. De plus, seulement 26 % des initiatives IIoT sont considérées comme des succès complets. Ce mémoire présente, dans un premier temps, les différents concepts de la maintenance industrielle incluant la maintenance 4.0. Puis il détaille les facteurs influençant la décision d'implantation. On y observe, entre autres, que le défi des ressources humaines est considéré comme plus important, suivi par les risques financiers. L'aspect technologique arrive en troisième place avec sensiblement moins d'importance. En ce qui concerne les ressources humaines, l'acceptabilité d'un tel projet est cruciale. Selon Johansen (2017), L'IoT et la maintenance 4.0 peuvent sembler être une question de technologie, mais les facteurs humains tels que la culture, l'organisation et le leadership sont essentiels au succès du projet. Un outil permettant d'en évaluer préalablement l'impact est présenté et testé sur un projet d'implantation d'outil technologique. Le positionnement de la maintenance en entreprise est décrit puis certains projets d'implantation technologiques sont analysés. Enfin, un sondage sur la démarche d'implantation proposée a été réalisé auprès des intervenants du milieu. La démarche d'entrée de gamme a été conçue afin de permettre aux équipes de maintenance de débuter et progresser en maintenance 4.0. Elle facilite l'introduction du 4.0 en adressant ses principaux inhibiteurs, dont les facteurs humains et les risques financiers. Cette démarche vise particulièrement les équipes de maintenance des PME, des services externalisés et les projets pilotes avant une implantation majeure. De plus, l'utilisation des capteurs IIoT peut être un apport intéressant pour les processus de résolution de problèmes. Finalement, on propose un rapport prévisionnel soutenant la chaîne de valeur de connaissance. Celui-ci fournit un suivi de l'état des équipements et de l'efficacité des interventions de maintenance. Crée en langage R, il est adapté pour répondre aux besoins de l'entreprise et son niveau de capacités d'analyse.

Mots-clés : maintenance 4.0, IIoT, maintenance prévisionnelle, amélioration continue, implantation progressive

Maintenance 4.0 progressive implementation approach

Robert VADEBONCOEUR

ABSTRACT

Nowadays, in addition to the costs directly involved, the stakes of the maintenance function are increasingly critical for the company. While promising and attracting interest, the maintenance 4.0 approach is receiving a mixed reception in the enterprise. About 20% of companies expect to implement solutions on a large scale by 2022. Their leaders say that adopting IIoT solutions poses many challenges from both a human resources, financial risk and technology perspective. In addition, only 26% of IIoT initiatives are considered complete successes. This brief first presents the different concepts of industrial maintenance including Maintenance 4.0. It then details the factors influencing the implementation decision. Among other things, it is observed that the human resources challenge is considered more important, followed by financial risks. The technological aspect comes in third place with significantly less importance. Regarding human resources, the acceptability of such a project is crucial. According to Johansen (2017), IoT and Maintenance 4.0 may seem like a technology issue, but human factors such as culture, organization, and leadership are critical to the success of the project. A tool to assess the impact beforehand is presented and tested on a technology tool implementation project. The positioning of maintenance in the company is described and some technology implementation projects are analyzed. Finally, a survey on the proposed implementation approach was conducted with stakeholders in the field. The entry-level approach was designed to allow maintenance teams to start and progress in 4.0 maintenance. It facilitates the introduction of 4.0 by addressing its main inhibitors, including human factors and financial risks. This approach is particularly aimed at maintenance teams in SMEs, outsourced services and pilot projects before a major implementation. In addition, the use of IIoT sensors can be an interesting contribution to problem solving processes. Finally, a forecast report supporting the knowledge value chain is proposed. This report provides a follow-up of the state of the equipment and the efficiency of the maintenance interventions. Created in R language, it is adapted to meet the needs of the company and its level of analysis capabilities.

Keywords: maintenance 4.0, IIoT, predictive maintenance, continuous improvement, progressive implementation

Table des matières

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Fonction maintenance	3
1.1.1 Positionnement de la fonction maintenance	3
1.1.2 Environnement complexe	4
1.1.3 Coût direct de la maintenance	5
1.1.4 Enjeux de la maintenance	5
1.1.5 Impact sur le développement durable	6
1.2 Fiabilité des équipements	6
1.2.1 Taux de défaillance	6
1.2.2 Courbe d'évolution de la défaillance	9
1.3 Politique de maintenance	9
1.3.1 Politique de maintenance réactive	10
1.3.2 Politique de maintenance préventive – systématique	11
1.3.3 Politique de maintenance conditionnelle	12
1.3.4 Politique de maintenance prévisionnelle	12
1.3.5 Maintenance 4.0	13
1.3.6 Équilibre des modes de maintenance	15
1.4 Aspects de la maintenance prévisionnelle	16
1.4.1 Identification des indicateurs	16
1.4.2 Modélisation des indicateurs	17
1.4.3 Prévisions d'indicateurs	17
1.4.4 La prise de décision	17
1.4.5 Facteurs de performances d'un modèle prévisionnel	18
1.5 Récapitulatif	18
CHAPITRE 2 DÉCISION D'IMPLANTATION	19
2.1 Introduction	19
2.2 Accueil mitigé des entreprises	21
2.3 Obstacles à l'adoption de la maintenance 4.0	21
2.3.1 Sécurité et confiance	24
2.3.2 Intégration TI / TO	25
2.3.3 Retour sur investissement incertain	26
2.3.4 Expertise technique ou complexité	27
2.3.5 Risque dû au fournisseur	29
2.3.6 Maturité des capacités d'analyses	30
2.4 Décision d'implantation d'une approche prévisionnelle	31
2.5 Récapitulatif	32
2.6 Conclusion	32
CHAPITRE 3 ACCEPTATION DE LA TECHNOLOGIE	33

3.1	Introduction.....	33
3.2	Modèle d'acceptation de la technologie TAM2.....	34
3.3	Projet Opale-PC	36
3.3.1	Contexte	36
3.3.2	Défis d'acceptation	38
3.3.3	Développement et implantation.....	39
3.3.4	Résultat	41
3.3.5	Application du modèle TAM2 sur Opale PC.....	43
3.4	Récapitulatif.....	44
3.5	Conclusion	45
	 CHAPITRE 4 DISCUSSION	47
4.1	Contexte	47
4.1.1	Positionnement de la maintenance.....	47
4.2	Projets d'implantation en maintenance	48
4.2.1	Démarche de niveling de charge de travail — nettoyage	49
4.2.2	Échange sur la fiabilité en exploitation.....	50
4.2.3	Système de suivi des interventions sur les équipements d'incendies	51
4.2.4	Système de saisie de formulaire par reconnaissance de caractères	52
4.2.5	Opale PC	55
4.2.6	Observations	57
4.3	Sondage sur la perception de la démarche.....	57
4.3.1	Caractéristique de l'échantillon	57
4.3.2	Qualification de l'échantillonnage.....	58
4.3.3	Objectif du sondage	59
4.3.4	Perception des intervenants sur la démarche	59
4.3.5	Commentaires des intervenants	60
4.3.6	Commentaires sur le rapport prévisionnel.....	61
4.4	Positionnement de la démarche proposée	61
4.4.1	Avantages et limites de l'approche proposé	62
4.4.2	Situations où le système proposé serait bien adapté	63
4.5	Conclusion	66
	 CHAPITRE 5 PROPOSITION D'UNE DÉMARCHE D'ENTRÉE DE GAMME.....	67
5.1	Introduction.....	67
5.2	Système versus application	67
5.3	Contraintes et critères de conception	68
5.4	Structure de la démarche proposée	69
5.4.1	L'encadrement	69
5.4.2	Démarche	70
5.4.3	Fonction captation.....	76
5.4.4	Fonction intégration.....	78
5.5	Impact sur la gestion des connaissances	82
5.5.1	Compréhension partagée, la connaissance empirique	84
5.5.2	Création de données, l'acquisition.....	84

5.5.3	Création des informations, la contextualisation.....	85
5.5.4	Création de la connaissance, l'analyse	89
5.6	Tendances en matière d'adoption de l'IoT pour 2022.....	90
5.7	Implantation en entreprise.....	91
5.8	Récapitulatif.....	92
5.9	Conclusion	93
CHAPITRE 6 RAPPORT PRÉVISIONNEL		95
6.1	Introduction.....	95
6.2	Objectif du rapport prévisionnel	96
6.3	Principales parties du rapport prévisionnel.....	96
6.3.1	Identification et mise en contexte	96
6.3.2	Sources de données	97
6.3.3	Statistiques de maintenance	105
6.3.4	Maintenance prévisionnelle	112
6.3.5	Modèles prévisionnels	117
6.3.6	Tableau des interventions à moins 20 % du MTBF.....	126
6.4	Conclusion	126
CONCLUSION 129		
À PROPOS DE L'AUTEUR		133
ANNEXE I TABLEAU D'ENTRAINEMENT DU MODÈLE PRÉVISIONNEL		135
ANNEXE II EXEMPLE DE FORMULAIRE DE RETOUR TECHNIQUE		136
Figure – A II-1 Exemple de formulaire de retour technique		136
ANNEXE III EXEMPLE DE RAPPORT PRÉVISIONNEL.....		137
BIBLIOGRAPHIQUE		169

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Nouvelles préoccupations TI/TO	26
Tableau 2.2 Taux de succès de projets informatiques (2011-2015) Traduit de : Chaos Report (2015)	27
Tableau 3.1 Concept TAM2 Traduit de Venkatesh (2000)	35
Tableau 3.2 Concepts TAM2 appliqué au projet Opale PC.....	43
Tableau 5.1 Contraintes de conception.....	68
Tableau 5.2 Critères de conception.....	69
Tableau 5.3 Évaluation de la démarche proposée avec le modèle TAM2	74
Tableau 5.4 Exemple de données transférées	79
Tableau 6.1 Exemple de classe de durée de vie des équipements	112
Tableau 6.2 Matrice prédition-observé	115
Tableau 6.3 Tableau des prévisions	126

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Environnement complexe, les équipements fixes du métro de Montréal.....	4
Figure 1.2 Exemples typiques de taux de défaillance Traduit de Krishnamoorthi K.S (2019, p. 159)	8
Figure 1.3 Courbe d'évolution de défaillance typique Traduit de : https://powerdbyrx.com/ressource/Involving-Operator-in-your-equipment-maintenance-plans-1882.html	9
Figure 1.4 Différentes politiques de maintenance	10
Figure 1.5 Maintenance réactive.....	11
Figure 1.6 Maintenance préventive.....	11
Figure 1.7 Maintenance conditionnelle.....	12
Figure 1.8 Maintenance prévisionnelle.....	12
Figure 1.9 Révolutions industrielles au fil des siècles Tirée de Bédard-Maltais (2017, p.3). .	13
Figure 1.10 Type d'erreur de prévision	14
Figure 1.11 Pourcentage de maintenance des meilleures pratiques réelles et perçues Traduit de Blache, K. (2019)	15
Figure 1.12 Facteurs de performance d'un modèle prévisionnel.....	18
Figure 2.1 Principales raisons identifiées pour mettre en œuvre les solutions IoT Traduit de Bain Iot Customer survey (2016).....	20
Figure 2.2 Niveau d'adoption d'IIoT dans les entreprises Traduit de Bosche (2018).....	21
Figure 2.3 Obstacles les plus importants à l'adoption de solutions IIoT/Analytiques Traduit de Bain Iot Customer survey (2016).....	22
Figure 2.4 Obstacles à l'adoption des technologies de l'Internet des objets Tiré de Bédard-Maltais (2017).....	23
Figure 2.5 Regroupement des types de défis des solutions 4.0 Tiré de Blackburn-Grenon, F. (2021).....	23

Figure 2.6 Criticité des résultats défavorables du blocage du fournisseur Traduit de Opara-Martins et all. (2016).....	29
Figure 2.7 Modèle de maturité des capacités d'analyse	30
Figure 2.8 Modèle de décision d'implantation d'une approche prévisionnelle.....	31
Figure 3.1 Résultats rapportés du TAM2 (n=468) Traduit de Venkatesh, V. & All. (2000)...	34
Figure 3.2 Application Opale-PC Tiré de Vadeboncoeur, R (2014)	38
Figure 3.3 Répartition des utilisateurs d'Opale-PC	41
Figure 3.4 Modules/fonctions développés dans l'application Opale PC	42
Figure 3.5 Résultat de TAM2 appliqué au projet Opale PC.....	44
Figure 4.1 Prise d'informations via CAB.....	52
Figure 4.2 Processus Teleform	53
Figure 4.3 Gestion de projet: Cascade VS Agile Traduit de https://www.trustradius.com/difference-between-agile-vs-waterfall	56
Figure 4.4 Comparaison Bédard-Maltais (2017) vs Sondage	58
Figure 4.5 Perceptions des intervenants sur la démarche proposée.....	59
Figure 4.6 Répartition des emplacements d'entreprises selon la tranche d'effectif. Tiré de l'Institut de la statistique du Québec (Mai 2020).....	63
Figure 4.7 Exemple de support au diagramme Ishikawa	65
Figure 4.8 Coffret d'intervention et de caractérisation d'événements.....	66
Figure 5.1 Processus d'implantation.....	72
Figure 5.2 Concept de produit minimum viable : Livraison à chaque étape orientée vers le résultat final Traduit de www.expressiveproductiondesign.com	73
Figure 5.3 Résultat de TAM2 appliqué à la démarche proposée	75
Figure 5.4 Composants de la fonction captation.....	77
Figure 5.5 Fonction intégration.....	78
Figure 5.6 Capture d'écran du logiciel l'application <i>FMDS^{4.0}</i>	80

Figure 5.7 Chaîne de valeur DICC Tiré de Ermine, Moradi & Brunel (2012).....	82
Figure 5.8 Zone d'influence du système (en jaune) sur le modèle CVC Tiré de Ermine, Moradi et Brunel (2012), jaune ajouté.....	83
Figure 5.9 Connaissances empiriques.....	84
Figure 5.10 Acquisition des données.....	84
Figure 5.11 Création des informations.....	85
Figure 5.12 Graphique de suivi de deux ventilateurs	86
Figure 5.13 Lecture du capteur	88
Figure 5.14 Moteur d'analyse.....	89
Figure 6.1 Exemples d'identification du rapport	97
Figure 6.2 Exemples de description des équipements	98
Figure 6.3 Exemple de description de la télémétrie.....	99
Figure 6.4 Exemple d'historique d'entretien préventif.....	101
Figure 6.5 Exemple d'historique d'entretien correctif.....	102
Figure 6.6 Exemple d'historique d'entretien curatif.....	103
Figure 6.7 Exemple d'historique d'entretien curatif (suite).....	104
Figure 6.8 Exemple de statistique de coût de maintenance	105
Figure 6.9 Exemple de répartition du nombre d'interventions	106
Figure 6.10 Distribution des interventions par types d'interventions et composants	107
Figure 6.11 Exemple d'impact sur la fiabilité par employé.....	108
Figure 6.12 Exemple d'impact sur la fiabilité par composant	109
Figure 6.13 Exemple d'impact sur la fiabilité par trimestre	110
Figure 6.14 Exemple de caractérisation des capteurs	111
Figure 6.15 Exemple de préparation des données	112
Figure 6.16 Exemple de préparation des données pour l'apprentissage machine	113

Figure 6.17 Exemple de résultat de régression linéaire	117
Figure 6.18 Exemple d'influence relative sur un modèle de régression linéaire.....	118
Figure 6.19 Exemple de résultat d'arbre de décision.....	119
Figure 6.20 Exemple d'influence relative des variables sur un modèle d'arbre de décision.	120
Figure 6.21 Exemple de résultat de forêt aléatoire	121
Figure 6.22 Exemple de résultat de forêt aléatoire	121
Figure 6.23 Exemple d'influence relative des variables sur un modèle de forêt aléatoire	122
Figure 6.24 Classement KNN	123
Figure 6.25 Exemple de résultat de KNN.....	124
Figure 6.26 Exemple de résultat de KNN	125
Figure 6.27 Solution GMAO Opale.....	133

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AFNOR	Association française de normalisation
CART	Modèle de classification - Arbre de décision (Classification and regression trees)
CAB	Code à barres
CVC	Chaîne de valeur de connaissance
EÉF	Direction de l'Entretien des équipements fixes du Métro de Montréal
FMDS 4.0	Système destiné à l'introduction et le soutien à la maintenance 4.0 (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Sécurité 4,0)
F1	Mesure qui combine la précision et le rappel en leur moyenne harmonique, le 1 signifie que la précision et le rappel sont pondérés de façon égale
GC	Gestion des connaissances
GI	Division du génie industriel (STM)
GMAO	Logiciel de gestion de la maintenance assisté par ordinateur
IIoT	Internet des objets industriels
IoT	Internet des objets
KNN	Modèle de classification - k plus proches voisins (k-NN)
NB	Modèle de classification - Classification naïve bayésienne (Naïve Bayes)
MTBF	Temps moyen de bon fonctionnement (mean time between failures), Source : Thomas, M. (2012)
PI	Service de protection incendie (STM)
PME	Petite et moyenne entreprise
PMI	Project Management Institute
RP	Rapport prévisionnel
RF	Modèle de classification - Forêt aléatoire (Random Forest)

RLG	Modèle de classification - Régression Linéaire Généralisée (Generalized Boosted Regression)
SaaS	Détection en tant que service (Sensing as a Service)
STM	Société de transport de Montréal
RLG	Modèle de classification - Régression Linéaire Généralisée (Generalized Boosted Regression)
TAM, TAM2	Modèles d'acceptation de la technologie (Technology Acceptance Model)
TI	Technologie de l'information
TO	Technologie d'opération
vba	Visual Basic pour Application (langage de programmation Microsoft Office)
4.0	Lié à l'industrie 4.0, axées sur la connectivité des données et des objets

INTRODUCTION

La maintenance des équipements est une nécessité pour la plupart des entreprises. Elle a un impact direct sur les coûts, la qualité, la fiabilité et la sécurité de l'offre. À ses débuts, la maintenance était uniquement curative, puis s'est ajouté la maintenance préventive systématique et la maintenance conditionnelle. De nos jours, les professionnels du domaine parlent de plus en plus de la maintenance prévisionnelle. Celle-ci se base sur les caractéristiques des équipements, les retours d'expérience et la saisie en temps quasi réel des paramètres de fonctionnement à l'aide de capteurs. Ces informations sont compilées par des outils analytiques afin de prévoir les pannes et d'optimiser les interventions de maintenance.

Les possibilités de la maintenance 4.0 sont prometteuses. Deloitte Analytics Institute (Schleichert, Olaf & all., 2017) cite qu'en moyenne, la maintenance prévisionnelle augmente la productivité de 25 %, réduit les pannes de 70 % et diminue les coûts de maintenance de 25 %. Cependant, malgré l'intérêt de la maintenance prévisionnelle (IoT/analytique), environ 90 % des personnes interrogées dans le cadre d'une enquête de Bosche (2016) en sont encore au stade de la planification ou de la validation du concept et environ 20 % seulement s'attendent à mettre en œuvre des solutions à grande échelle d'ici 2022.

Selon le gouvernement du Canada (2016), les pourcentages les plus élevés de petites et moyennes entreprises (PME) innovatrices se retrouvaient dans les secteurs de la fabrication (61,5 %). Ce secteur représente 1,4 million d'emplois au Canada. Dans un contexte de mondialisation, un retard dans l'implantation de technologies innovantes, dont les solutions de maintenance prévisionnelle IIoT/analytique, pourrait pénaliser la compétitivité du pays.

Le présent mémoire propose aux équipes de maintenance et de soutien une démarche et des outils d'entrée de gamme conçus afin de faciliter le démarrage et la progression en maintenance 4.0.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Fonction maintenance

Selon la norme EN 13 306 (2010), la maintenance est « L'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. ».

Faire de la maintenance, c'est effectuer des interventions (dépannage, nettoyage, graissage, inspection, réparations, améliorations, etc.) qui permettent de conserver le potentiel des équipements pour assurer la continuité et la qualité de la production ou la livraison de service. Réaliser une bonne maintenance, c'est assurer ses opérations en maintenant la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité et au meilleur coût possible.

1.1.1 Positionnement de la fonction maintenance

Selon Opara-Martins (2003), produire un bien ou un service, le concevoir, l'améliorer et le commercialiser sont des fonctions porteuses, facilement identifiables et rarement négligées. Par contre, la maintenance n'est qu'un service de soutien à la production. Bien qu'elle soit l'une des fonctions nécessaires de l'entreprise, elle n'est pas une fin en soi. À ce titre, elle est peu visible et, régulièrement, son impact est sous-estimé par la haute direction.

Lorsqu'elle répond bien à sa mission, on en entend peu parler. Il est facile d'y faire des coupures sans trop d'impacts à court terme. C'est souvent « par défaut » que la preuve est faite. Le coût des conséquences d'une panne majeure, incluant sa médiatisation, engendre la prise de conscience que l'on doit avoir une maintenance efficace.

Cependant, la maintenance devient une composante de plus en plus stratégique de la performance de l'entreprise. Il est donc important de la faire mieux connaître. Bien organisée, elle est un facteur important de qualité, de sécurité, de respect des délais et de productivité, donc de compétitivité d'une entreprise. C'est peut-être incontestable après des expériences négatives, mais ce n'est pas évident de prime abord. Positionner la maintenance au sein de l'appareil de production est un exercice difficile particulièrement dans un environnement complexe.

1.1.2 Environnement complexe

Compte tenu des multiples équipements utilisés pour la production ou la livraison du service, le service de maintenance implique généralement plusieurs corps de métiers internes ou externes.

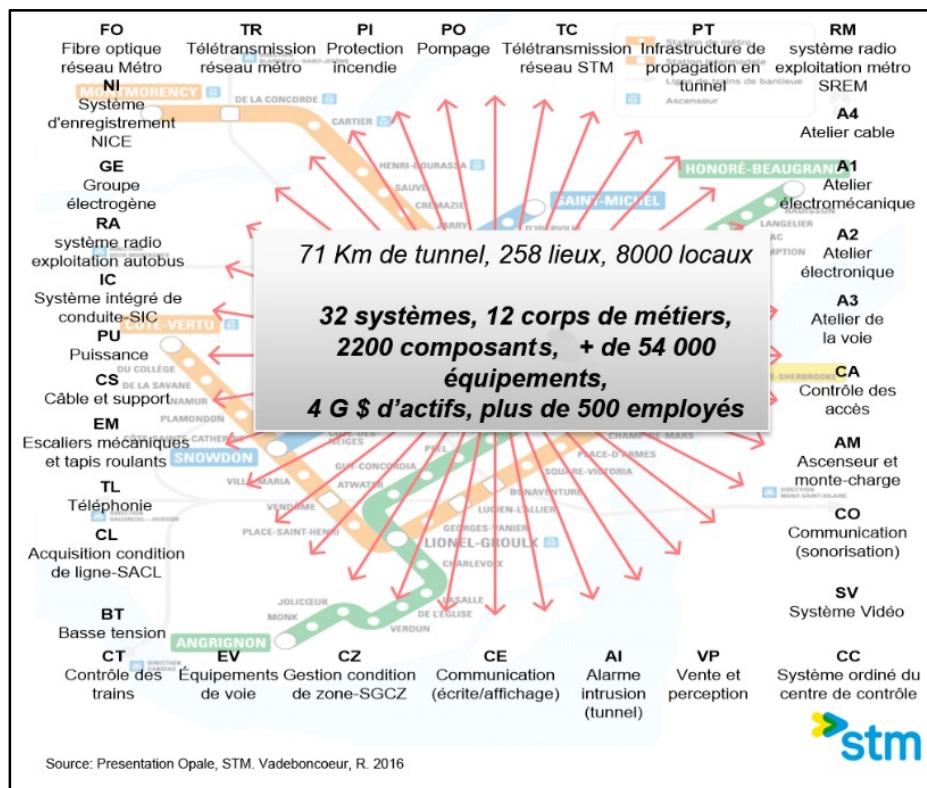


Figure 1.1 Environnement complexe, les équipements fixes du métro de Montréal

Tirée de Vadeboncoeur, R. (2016, p.5)

1.1.3 Coût direct de la maintenance

Une enquête de Robertson et Jones (2004) indique que le budget de la maintenance varie de 2 % à 90 % du budget des opérations des usines avec une moyenne de 20.8 %. Par exemple, dans le budget de la STM (2018), pour les années 2016, 2017 et 2018, les employés d'entretien représentent 25.9 % (année-personne) contre 47 % pour les chauffeurs et opérateurs.

Selon Manufacturiers et exportateur du Québec (2015), il est généralement reconnu dans l'industrie que chaque heure éliminée en travaux urgents se traduit par trois heures de main-d'œuvre disponible pour les travaux planifiés et ordonnancés. Par ailleurs, le gain le plus important se situe sur le plan des opérations. Pour les manufacturiers, un arrêt planifié a beaucoup moins d'impacts négatifs qu'un bris en production.

1.1.4 Enjeux de la maintenance

De nos jours, en plus des coûts directs, les enjeux de la fonction maintenance sont de plus en plus critiques pour l'entreprise. Selon Heintz (2018), les défaillances d'équipement, à la suite d'une mauvaise maintenance, peuvent avoir des conséquences majeures, notamment :

- Catastrophes industrielles : Pesticides (Bhopal, 1984) ;
- Atteinte à l'environnement : marée noire (Amoco Cadiz 1978), surconsommation de ressource ;
- Coûts matériels directs : réparation des matériels, dégâts secondaires, main-d'œuvre.
- Impacts commerciaux : image de marque, diminution du prix de vente, perte de parts de marché, coûts de la publicité, risques de boycottage ;
- Impacts juridiques : coûts de contentieux, des assurances, des pénalités, des frais de justice, des procédures, des avocats et amendes ;
- Coûts à long terme : embauche de personnel en cas de surcharge de maintenance, mise en place de procédures de sécurité et de matériels de sécurité, certification des utilisateurs ;
- Impacts sur la production : manque à gagner, perte de production, perte de qualité, chômage technique, coûts des inventaires, pertes de résultats ;

- Impacts sur l'environnement : dépollution, démantèlement, requalification par les organismes de réglementations, adaptation aux normes environnementales ;
- Dommages corporels : soins médicaux, assurances vie, arrêts de travail, incapacité, premiers secours, rentes et indemnités ;
- Coûts secondaires : expertise des avaries, modification du système, frais de consultants.

1.1.5 Impact sur le développement durable

La maintenance, selon AFNOR FD X 60-000 (2016), est également un pilier du développement durable puisqu'elle permet d'accroître la disponibilité des biens et leur durée d'exploitation, réduisant ainsi les coûts, les énergies, les matériaux nécessaires pour en construire de nouveaux et les déchets produits par leur mise au rebut. Elle produit également du travail local et apporte ainsi un bénéfice social en plus des aspects économiques et environnementaux.

Dans ce contexte, l'importance stratégique de la fonction maintenance, qu'elle soit intégrée et centralisée dans un seul service, répartie sur l'ensemble des acteurs du système productif ou externalisée, partiellement ou totalement, prend une nouvelle dimension dans le management d'une entreprise.

1.2 Fiabilité des équipements

1.2.1 Taux de défaillance

Selon Krishnamoorthi, K.S. et coll. (2019), la fiabilité désigne la capacité d'un équipement à fonctionner sans défaillance pendant une période donnée. La fiabilité est donc une fonction du temps. Elle est liée à la durée pendant laquelle un équipement fonctionne avant qu'une défaillance ne se produise. Cette durée avant défaillance est appelée durée de vie. La durée de vie est une variable aléatoire dans le sens où, dans une population donnée, bien que les équipements puissent tous avoir été construits selon le même procédé, la durée de vie d'un équipement pour la première défaillance, par exemple, sera différente de celle d'une autre. Pour le même équipement, le temps jusqu'à la première défaillance sera différent de celui de

la deuxième défaillance, et ainsi de suite. Ces valeurs de durée de vie sont considérées comme des valeurs d'une variable aléatoire.

La variabilité de la durée de vie peut être décrite par une distribution de fréquence et cette distribution de fréquence peut être obtenue à partir de données collectées sur la durée de vie de l'équipement échantillon si l'équipement existe déjà.

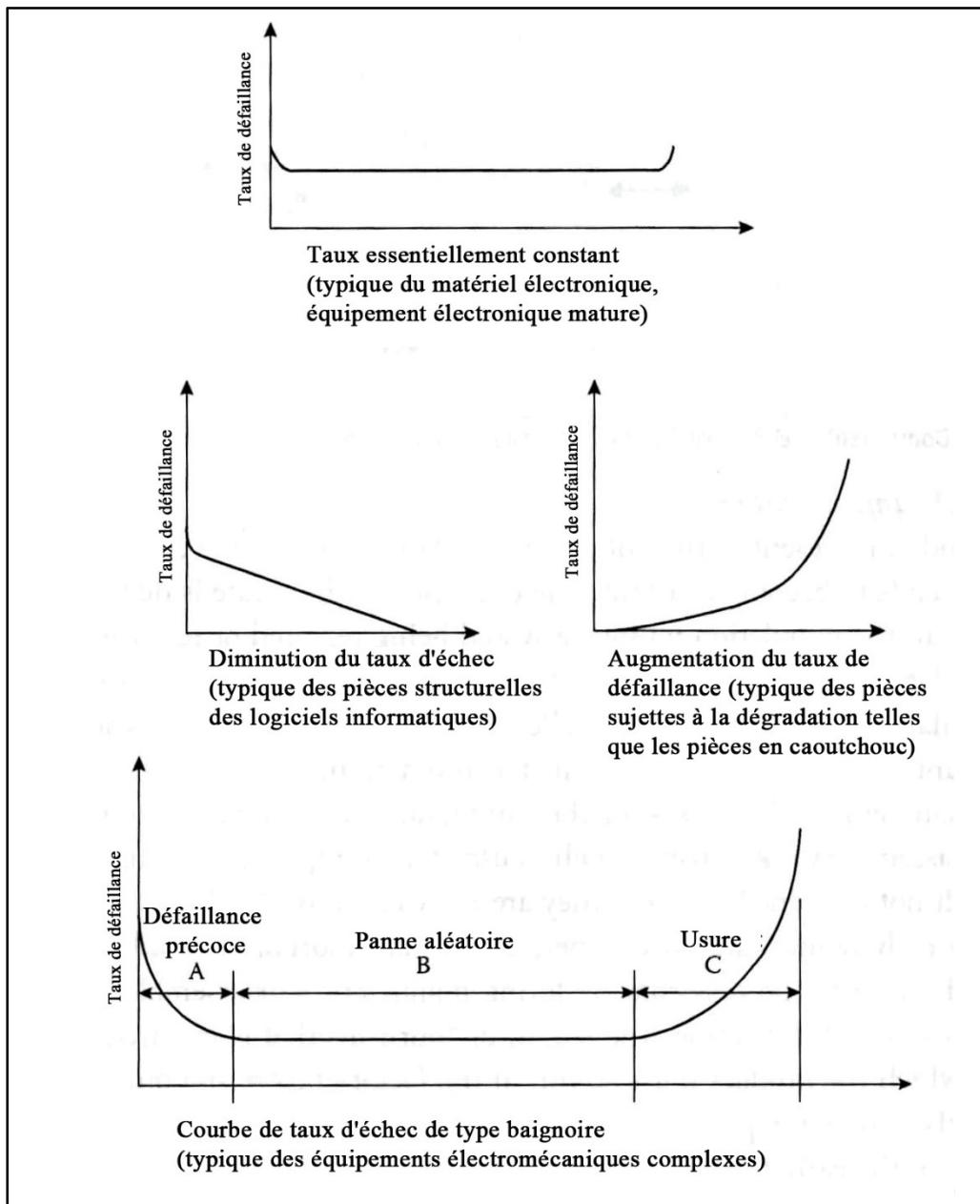


Figure 1.2 Exemples typiques de taux de défaillance
Traduit de Krishnamoorthi K.S (2019, p. 159)

1.2.2 Courbe d'évolution de la défaillance

Selon Blanchard (2018), la courbe d'évolution de la défaillance montre comment un symptôme se détériore au fil du temps, ou des cycles, et les différentes lignes de détection qui peuvent l'identifier. Plus tôt on peut détecter ces symptômes, plus l'organisation dispose de temps pour planifier et exécuter une réparation. Dans certains cas, des actions simples peuvent résoudre la cause de la dégradation et la courbe est prolongée.

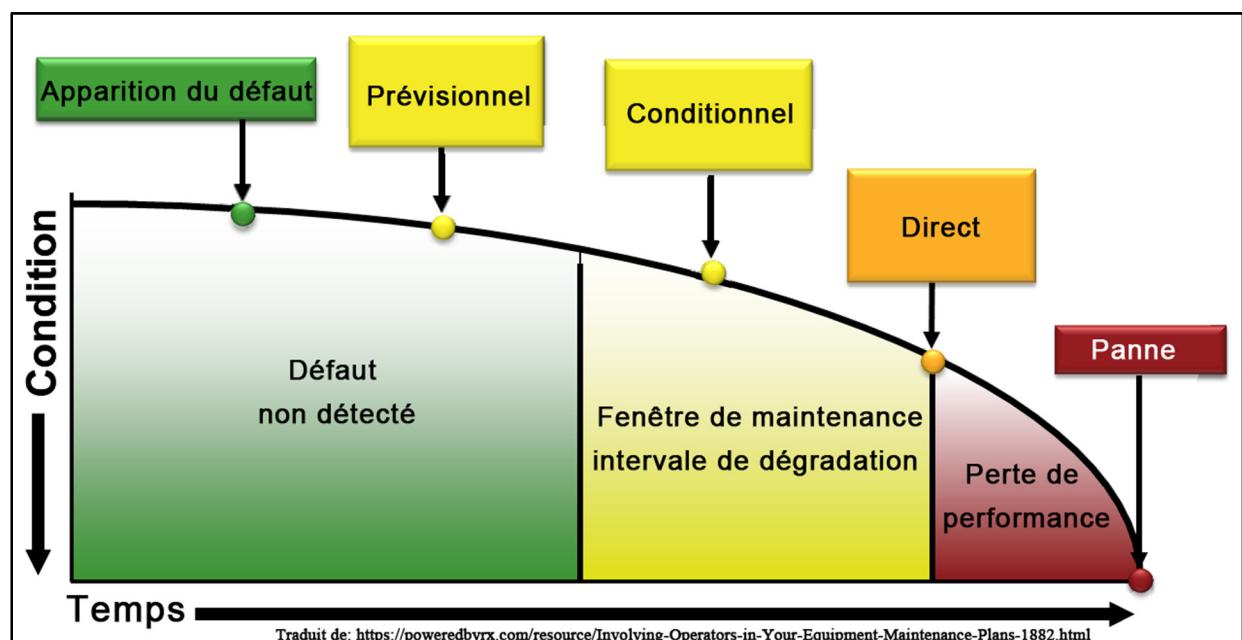


Figure 1.3 Courbe d'évolution de défaillance typique
 Traduit de : <https://powerdbyrx.com/ressource/Involving-Operator-in-your-equipement-maintenance-plans-1882.html>

1.3 Politique de maintenance

Pour Boulenger (2008), la politique de maintenance d'une entreprise consiste à fixer les orientations (méthode, programme, budget, etc.) dans le cadre des buts et objectifs fixés par la haute direction. Il existe plusieurs types de politique de maintenance. Normalement, le groupe maintenance utilise une combinaison de ces politiques pour établir une politique adaptée aux

besoins de l'entreprise. Jardine (2021) détaille les différentes méthodes de prise de décision pour optimiser les politiques de maintenance.

Type de maintenance	Réactive		Préventive		
	Palliative	Curative	Systématique	Conditionnelle	Prévisionnelle
Déclencheur/événement	défaillance		date/cycle	franchissement limite	dérives / tendance
Action	dépannage	réparation	Entretien systématique	Entretien sous condition	Entretien ciblé
			 Maintenance 4.0 		

Figure 1.4 Différentes politiques de maintenance

Tirée de <http://christian.hohmann.free.fr>

1.3.1 Politique de maintenance réactive

Selon la norme AFNOR FD X 60-000 (2016) de l'Association française de normalisation (AFNOR), la maintenance réactive est exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Elle peut être **curative**, afin de rétablir un bien dans un état spécifié (qui, donc, n'est pas nécessairement son état initial) pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, ou **palliative** (appelée couramment « dépannage ») dépanne un certain temps, mais ce temps ne peut être déterminé,

Cette politique garantit que chaque composant a la durée de vie maximale possible, mais peut provoquer des problèmes de temps d'arrêt ou de sécurité lorsque le composant tombe en panne.

Cette politique est acceptable s'il y a peu de risque de sécurité et de conséquences importantes. Elle est aussi utilisée si la panne est non prévisible, par exemple une vitre brisée à la suite d'un incident.

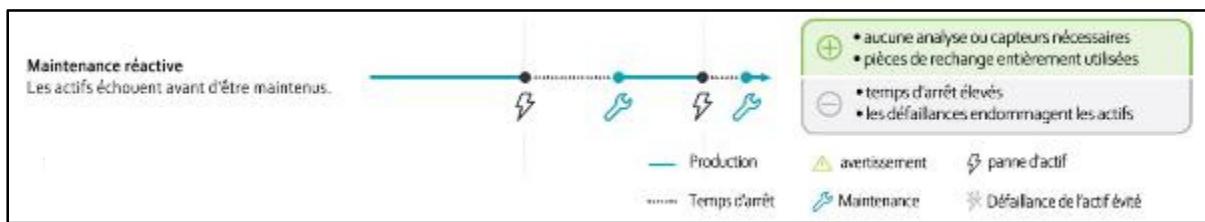


Figure 1.5 Maintenance réactive

1.3.2 Politique de maintenance préventive – systématique

Selon AFNOR FD X 60-000 (2016), la politique de maintenance préventive – systématique est exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et elle est destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. La maintenance préventive se divise en deux types : systématique et conditionnelle incluant la maintenance prévisionnelle.

La maintenance systématique est exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage, mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

Selon Boulenger (2008), cette stratégie minimise les temps d'arrêt imprévus et maximise la sécurité en définissant l'horaire de remplacement afin de minimiser les défaillances des composants. La maintenance systématique peut en outre contrôler certains coûts de maintenance parce que le calendrier de maintenance et les coûts sont connus a priori. Elle cause cependant une perte dans le cycle de vie des pièces de rechange, augmente la maintenance et cause des temps d'arrêt (prévisible). De plus, elle ne permet pas de détecter de dégradation imprévue entre les entretiens.

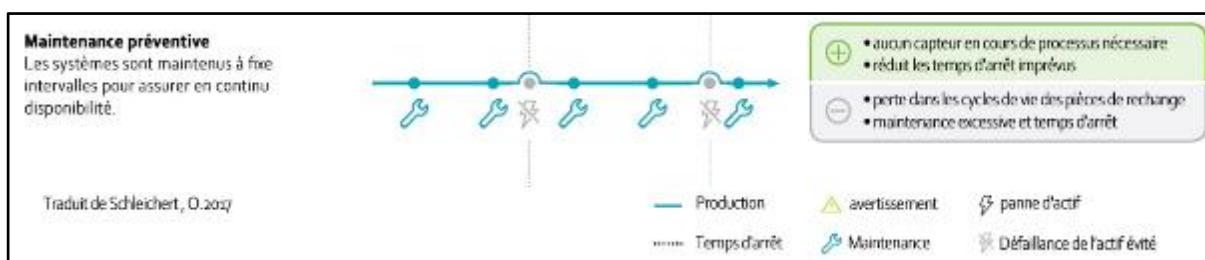


Figure 1.6 Maintenance préventive

1.3.3 Politique de maintenance conditionnelle

Selon la norme AFNOR NF EN13306 (2010), la maintenance conditionnelle est basée sur une combinaison de surveillance en fonctionnement et/ou en inspection et/ou en essai, d'analyse et d'actions qui en découlent. Cette surveillance peut être intermittente ou monitorée. On interviendra uniquement si certains paramètres (vibration, courant, voltage, etc.) évoluent hors de paramètres définis.

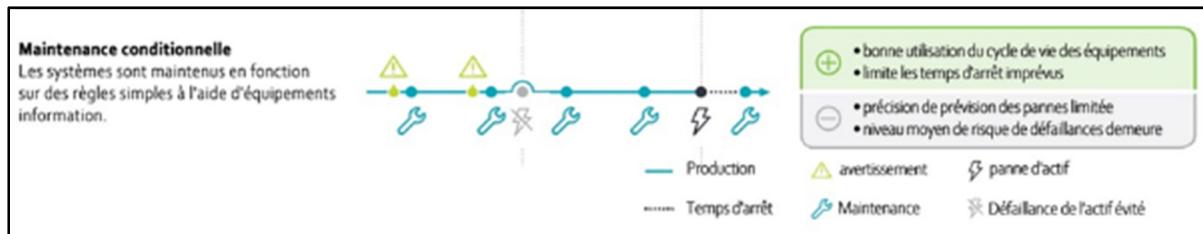


Figure 1.7 Maintenance conditionnelle

1.3.4 Politique de maintenance prévisionnelle

Selon Boulenger (2008), le suivi prévisionnel permet d'analyser l'évolution du dysfonctionnement après qu'il ait été détecté par mesure. Puis, on évalue la période pendant laquelle il est possible de continuer à l'utiliser avant la panne. Cette évaluation est réalisée à partir d'observations de l'état de l'équipement et de l'utilisation de modèles d'usure.

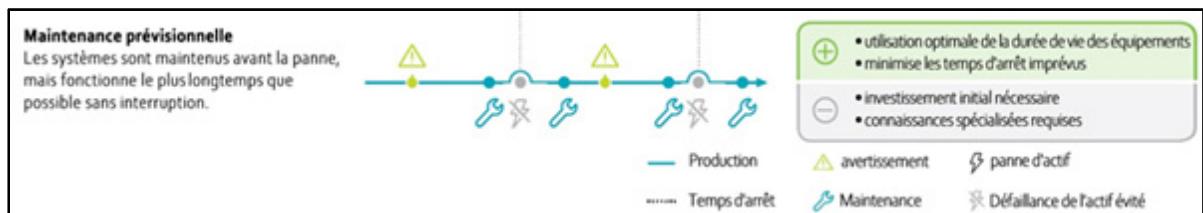


Figure 1.8 Maintenance prévisionnelle

Par exemple, lorsque le voyant de bas niveau d'essence s'allume sur le tableau de bord, on peut savoir qu'il reste 100 km d'utilisation avec peu de risque de panne sèche. Cette indication permet d'optimiser l'utilisation du véhicule en permettant de choisir le moment opportun pour faire le plein.

La maintenance prévisionnelle avec capteurs (dont les IIoT) permet d'augmenter la précision dans ce type d'intervention et d'en diminuer significativement les coûts tant par le volume d'information saisi que par la précision de celle-ci. L'analyse des données provenant des systèmes de surveillance est réalisée via des outils d'intelligence artificielle. Elle permet de prévoir, avec plus de fiabilité, les pannes et l'entretien d'une machine. L'arrêt de production non planifié est ainsi minimisé permettant aux entreprises d'augmenter leur productivité.

1.3.5 Maintenance 4.0

L'industrie 4.0 est la quatrième révolution industrielle de l'époque moderne. La première a utilisé la machine à vapeur pour mécaniser la production, alors que la seconde s'est servie de l'électricité pour créer la chaîne de montage et la production de masse. La troisième, quant à elle, s'est caractérisée par l'usage des technologies de l'information et de l'électronique pour automatiser la production.

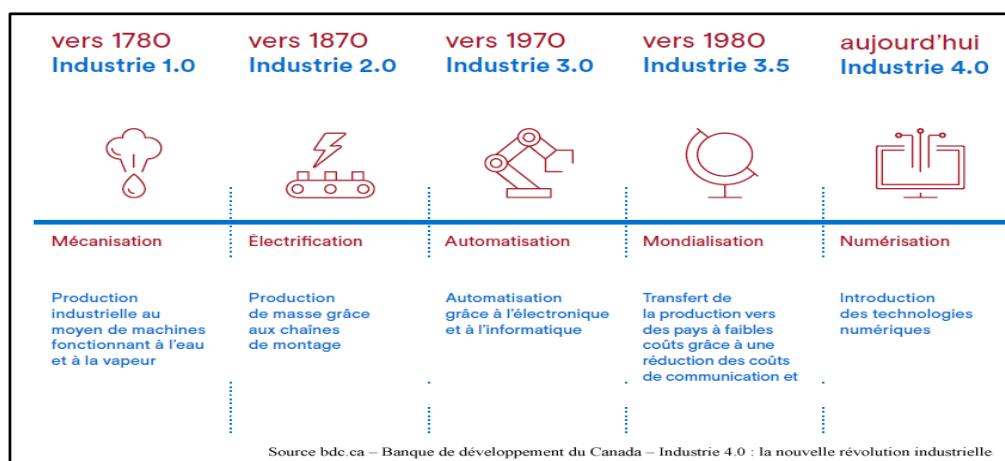


Figure 1.9 Révolutions industrielles au fil des siècles
Tirée de Bédard-Malais (2017, p.3).

Selon Infor (2021), la maintenance 1.0 s'est appuyée sur des spécialistes hautement qualifiés pour inspecter visuellement les machines. La maintenance 2.0 a fourni aux humains des instruments pour mesurer le fonctionnement de l'équipement, tandis que la maintenance 3.0 a utilisé la surveillance en temps réel pour comprendre l'état d'un équipement de manière systématique et à l'aide de programmation. Désormais, avec l'Internet des objets (IoT) collectant d'énormes quantités de données, la maintenance 4.0 voit ces données capturées dans un référentiel de données, et applique des algorithmes et des analyses pour mieux interpréter pourquoi les équipements tombent en panne, quand un équipement donné tombera en panne et comment corriger le problème.

Selon Kumar et Galar (2018), la maintenance 4.0 fait des analyses prévisionnelles et suggère une solution réalisable, en particulier sur les aspects de maintenance qui traitent de la collecte de données, de leur analyse et de la prise de décision sur les actifs. L'objectif de cette stratégie est de maximiser la durée de vie utile de l'équipement et d'éviter les défaillances. Au lieu de remplacer les composants selon une durée de vie fixe, un programme d'entretien prévisionnel fait passer le programme d'entretien à une approche de type « juste à temps ». La figure 1.9 présente la façon dont une stratégie de maintenance 4.0 permet intervenir sur l'équipement juste avant une panne, en maximisant la durée de vie des composants et en minimisant les pannes. Basé sur l'intelligence artificielle, il a été rapporté par Sullivan, G. P. & All. (2010) qu'elle peut diminuer les pannes de l'ordre de 70 %.

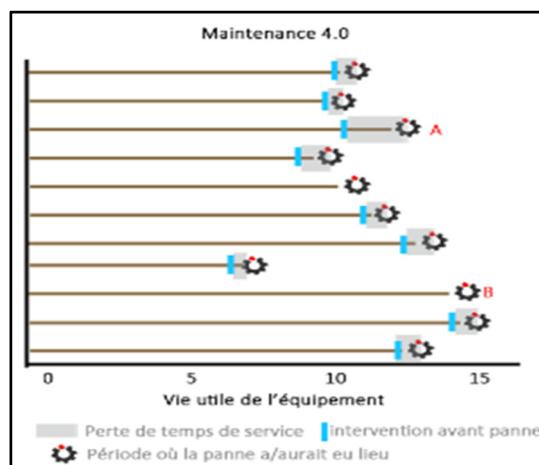


Figure 1.10 Type d'erreur de prévision

On observe deux types d'erreurs de prévision : soit que la panne a été prévue trop tard (B) et a eu lieu, soit que la panne a été prévue trop tôt (A) et qu'il y a une perte de temps de service utile. Notons cependant que le coût des deux pertes n'est pas équivalent. Il est couramment admis, en maintenance, qu'il vaut mieux faire l'intervention en avance et perdre du temps de service utile que de la faire après la panne. C'est d'ailleurs une des hypothèses qui soutient la maintenance préventive systématique. Notons, cependant, la maintenance 4.0 doit se cadrer dans une vision équilibrée des modes de maintenance.

1.3.6 Équilibre des modes de maintenance

Selon Dr Klaus Blache (2019), on doit rechercher un équilibre entre les différents modes de maintenance. On devrait tendre vers une proportion de 65 % d'entretien préventif qui se divisent en 20 % d'entretien préventif systématique basé sur les périodes (ou cycles) et 45 % d'entretien correctif avant la panne dont les 2/3 proviennent des signalements prévisionnels et 1/3 des retours lors d'entretien préventif. Un signalement prévisionnel informe d'une possibilité de panne à moyen terme. Dans ce cas, l'intervention peut être réalisée lors du prochain entretien préventif ce qui minimise les interruptions et optimise les ressources de maintenance. Une proportion de 25 % porte sur des entretiens en mode prévisionnel, car ils requièrent une action rapide face à une panne probable. Les derniers 10 % sont des entretiens purement

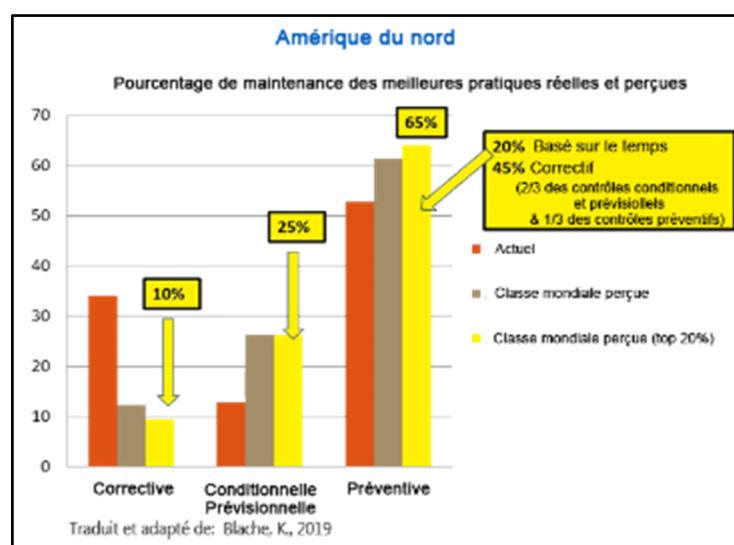


Figure 1.11 Pourcentage de maintenance des meilleures pratiques réelles et perçues
Traduit de Blache, K. (2019)

réactifs, après la panne. Ce graphique donne une proportion des modes de maintenance des meilleures pratiques de maintenance.

Ait El Cadi, A et coll. (2021) mentionne que pour réduire les gaspillages, mieux s'adapter aux besoins des clients et rester compétitives, les entreprises doivent ajuster leurs stratégies de production, de maintenance et de qualité : le taux de production, le niveau de stock, la fréquence de maintenance et les contrôles de qualité doivent être ajustés conjointement. Cependant encore peu d'ouvrages dans la documentation couvrent l'optimisation conjointe de la production, de la maintenance et du contrôle de la qualité tel que les arrêts programmés (shutdown) ou les réfections de demi-vie.

1.4 Aspects de la maintenance prévisionnelle

Selon Groba (2019), la maintenance prévisionnelle comprend plusieurs aspects qui doivent être pris en compte lors de son utilisation en entreprise.

1.4.1 Identification des indicateurs

Une des bases de la maintenance prévisionnelle est l'identification de paramètres physiques indiquant l'usure ou le vieillissement des équipements (indicateurs de fiabilité). La pertinence de ces indicateurs est cruciale, car les prévisions ne sont révélatrices que si les indicateurs de fiabilité sont corrélés à l'état physique des équipements.

On peut classer la saisie des informations de maintenance en trois types ;

- Les retours d'expérience (pannes, réparations, maintenance) rapportés par les intervenants ;
- Les caractéristiques des équipements ;
- Les mesures directes (capteurs).

1.4.2 Modélisation des indicateurs

La modélisation des indicateurs est nécessaire pour détecter les écarts et permettre les prévisions. La modélisation implique, entre autres, la détermination des caractéristiques dynamiques d'un indicateur, la sélection d'un modèle d'ajustement et le paramétrage.

Le résultat de cette étape est le modèle prévisionnel. Le modèle prévisionnel est un algorithme qui met en relation une série d'indicateurs et un résultat, par exemple le temps avant une panne. Le modèle devra être réévalué périodiquement en fonction des nouvelles mesures d'indicateurs.

1.4.3 Prévisions d'indicateurs

Lors de la prévision, on applique le modèle sur les informations actuelles afin de donner une estimation de résultats futurs.

1.4.4 La prise de décision

La réaction aux prévisions est aussi importante que la prévision elle-même. La décision sur la façon de réagir à une prévision doit prendre en compte à la fois la maintenance et les problèmes de production. La prise de décision inclut donc le choix d'intervention face à la panne anticipée et le moment de programmer la correction pour qu'elle interfère le moins possible avec les plans de production. Jardine (2021) établi des modèles mathématiques de prise de décision face à des actions de maintenance.

1.4.5 Facteurs de performances d'un modèle prévisionnel

Suite à la description des aspects de maintenance prévisionnelle, trois principaux facteurs agissant directement sur les performances du modèle prévisionnel peuvent être identifiés, soit :

- Pertinence/volume des retours d'expérience (pannes – entretiens)
- Pertinence/volume des mesures directes (capteurs)
- Sélection d'un modèle prévisionnel et son paramétrage

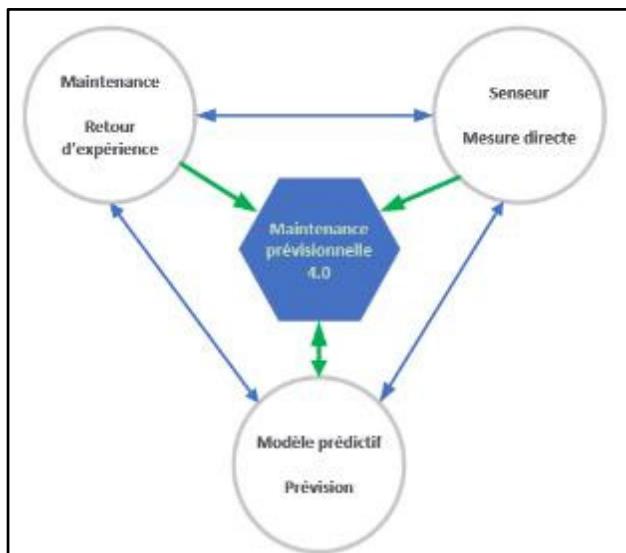


Figure 1.12 Facteurs de performance d'un modèle prévisionnel

Notons que, bien qu'elles influent sur le modèle prévisionnel, les caractéristiques des équipements telles que la marque, le modèle et l'âge sont considérées comme conditions initiales.

1.5 Récapitulatif

La revue de littérature a présenté l'importance stratégique de la maintenance industrielle, les coûts et les impacts. Il en ressort qu'il doit y avoir un équilibre entre les différents aspects de la maintenance ainsi qu'entre les différentes fonctions d'une entreprise.

CHAPITRE 2

DÉCISION D'IMPLANTATION

2.1 Introduction

La section 1.3.5 permet de mieux comprendre les avantages d'une politique de maintenance 4.0. Plusieurs analyses démontrent l'intérêt d'une telle démarche, notamment :

Selon Schleichert, Olaf & all. (2017), un programme de maintenance 4.0 devrait avoir comme impact :

- Réduction des coûts d'exploitation et des dépenses de matériel : 5 % à 10 %
- Augmentation du temps de fonctionnement et de la disponibilité des équipements : 10 % à 20 %
- Réduction des coûts globaux de maintenance : 5 % à 10 %
- Réduction du temps consacré à la planification de la maintenance : 20 % à 50 %.

Selon le McKinsey Global Institute (2015), les opérations d'optimisation, incluant la maintenance 4.0, auraient un impact économique mondial entre 1,2 et 3,7 milliards de \$ US d'ici 2025.

Selon Geissbauer (2018), 78 % des 1 155 entreprises interrogées sont en démarche pour planter la maintenance 4.0 (réflexion, prototype et implantation). Les gains/réductions de coûts attendus sont en moyenne de l'ordre de 12,3 %.

Un sondage (Bosche, 2016) auprès de 533 hauts gestionnaires a permis d'identifier les principales raisons identifiées pour mettre en œuvre les solutions IoT.

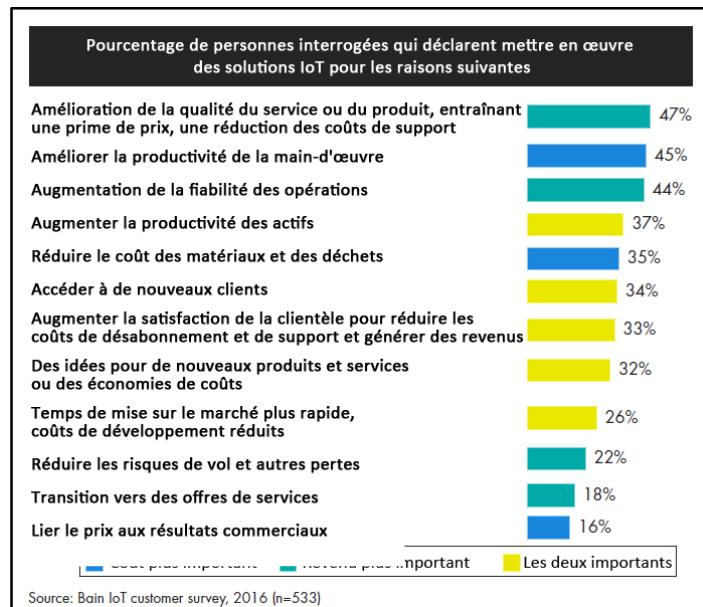


Figure 2.1 Principales raisons identifiées pour mettre en œuvre les solutions IoT
Traduit de Bain IoT Customer survey (2016)

2.2 Accueil mitigé des entreprises

Malgré l'intérêt de la maintenance prévisionnelle et des IIoT, en 2018, environ 92 % des entreprises interrogées dans le cadre d'une enquête de Bain & Cie (2018) en sont encore au stade de la planification et de la validation du concept. Environ 20 % seulement s'attendent à mettre en œuvre des solutions à grande échelle d'ici 2022. Les clients affirment que l'adoption de solutions IIoT pose de nombreux défis.

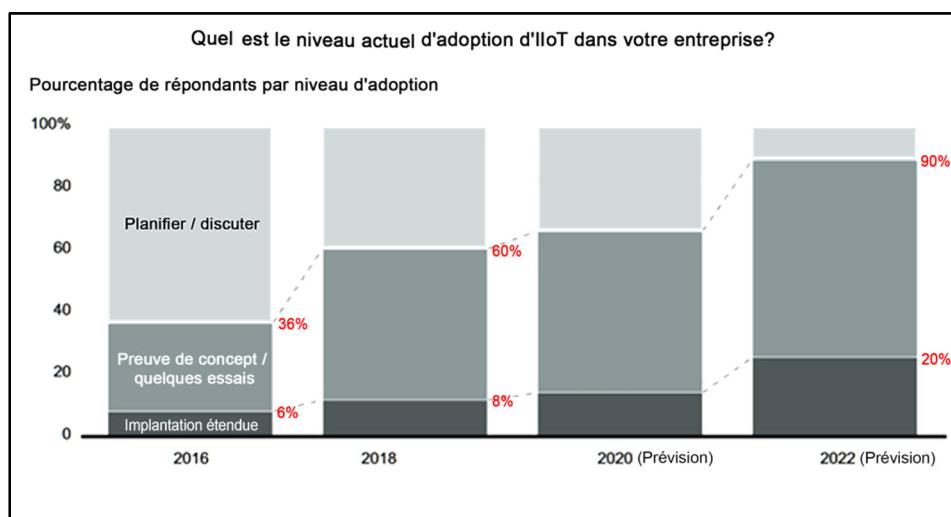


Figure 2.2 Niveau d'adoption d'IIoT dans les entreprises
Traduit de Bosche (2018)

2.3 Obstacles à l'adoption de la maintenance 4.0

Une étude de Bain & Cie (2018) auprès des industries a permis d'identifier les principaux obstacles à l'adoption de solutions maintenance 4.0, soit la sécurité, l'intégration IT/OT, le retour sur investissement incertain, l'expertise technique et l'interopérabilité. Les quatre premiers points n'ont pas changé entre 2016 et 2018.

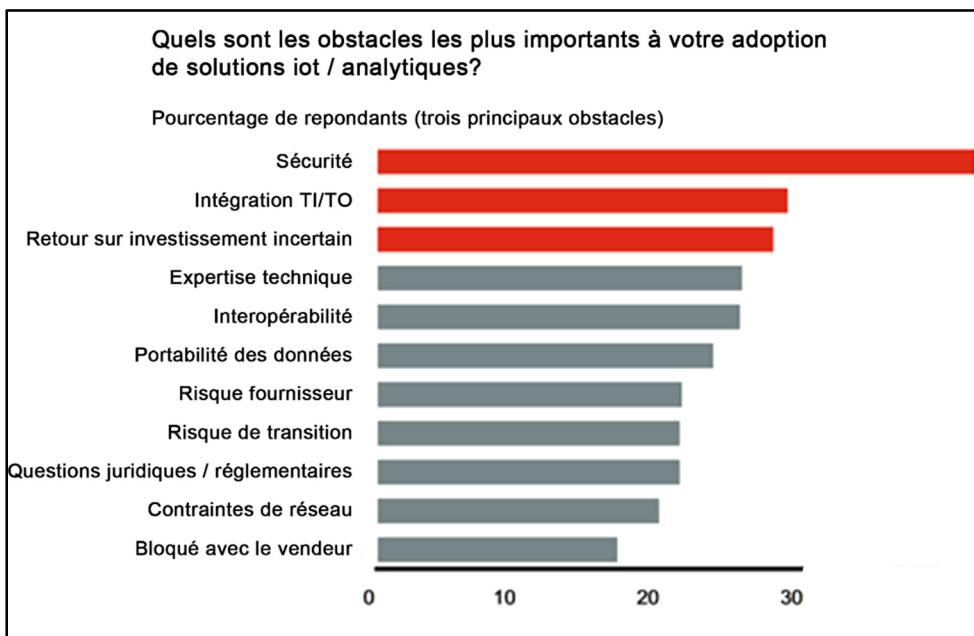


Figure 2.3 Obstacles les plus importants à l'adoption de solutions IIoT/Analytiques
Traduit de Bain IoT Customer survey (2016)

Plus près de nous, lors du Forum Adopte IoT (2017), il a été constaté que faciliter l'adoption de l'Internet des objets pouvait être perçu comme étant une démarche complexe. Le rapport confirme que la cybersécurité, l'interopérabilité, le partage des données et l'accès responsable sont les principaux obstacles à l'adoption des technologies de l'Internet des objets.

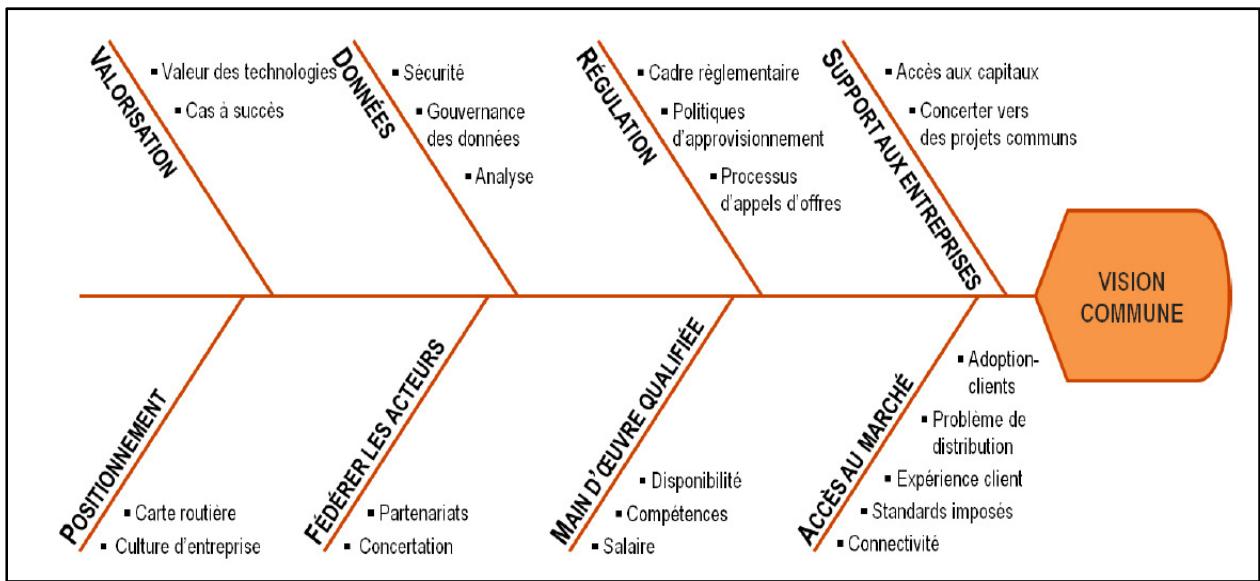


Figure 2.4 Obstacles à l'adoption des technologies de l'Internet des objets
Tiré de Bédard-Maltais (2017)

Dans son étude sur l'industrie 4.0, Bédard-Maltais (2017) identifie les plus grands défis liés à la mise en œuvre des solutions 4.0. Blackburn-Grenon, F. (2021) utilise cette liste et catégorise les principaux défis en trois types.

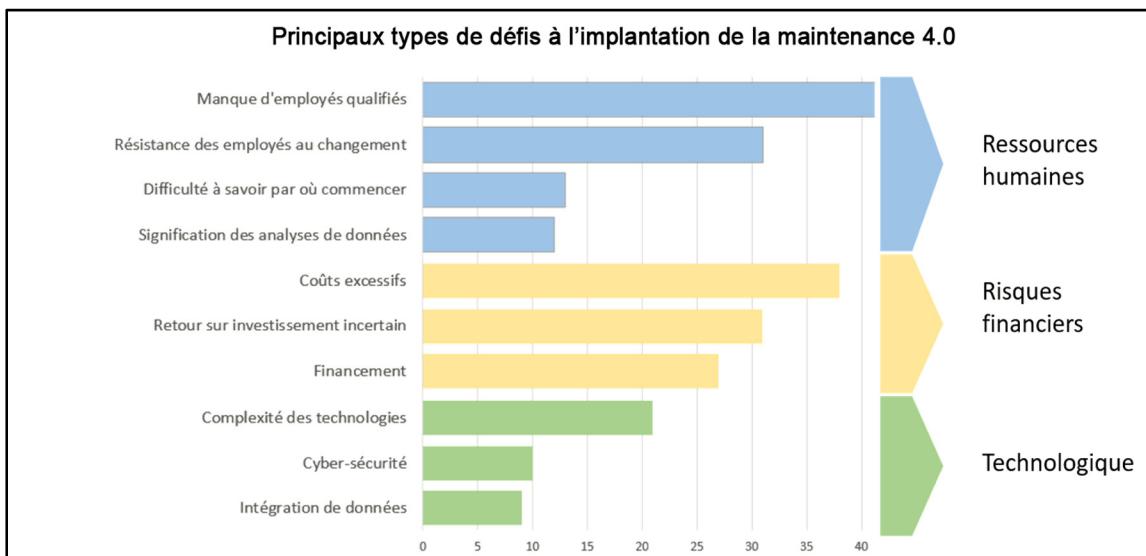


Figure 2.5 Regroupement des types de défis des solutions 4.0
Tiré de Blackburn-Grenon, F. (2021)

Ces graphiques sont représentatifs de la résistance à l'implantation de la maintenance prévisionnelle nonobstant l'intérêt soulevé. On observe du point de vue mondial, canadien et québécois que les obstacles sont sensiblement les mêmes. Il peut être intéressant de détailler les principaux obstacles.

2.3.1 Sécurité et confiance

La perception de sécurité et confiance est un paramètre critique qui doit être pris en compte dans l'offre de service dans le contexte d'infonuagique. Certains industriels ont dit que la crainte de voir sortir leurs secrets de fabrication ou des informations stratégiques est un facteur primordial qui doit être tenu en compte, un « No go ». (Forum Adopte IoT, 2017)

Selon Assante (2016), l'infonuagique manque encore de sécurité. Les récentes attaques informatiques rapportées peuvent donner raison à ces réticences. En outre, la sécurité perçue semble avoir une forte influence sur la confiance dans ce contexte, ce qui est un élément du processus d'établissement d'une relation de confiance. Une enquête sur les facteurs d'influence de l'acceptation de l'infonuagique parmi les PME autrichiennes a révélé l'importance de la sécurité perçue et de la sécurité réelle dans le contexte du processus d'adoption. Les partisans de l'infonuagique déclarent que son adoption contribue à améliorer la sécurité tandis que les opposants critiquent la gestion de la confidentialité et la sécurité des données. La sécurité perçue peut servir de catalyseur ou d'inhibiteur dans un scénario de basculement d'un système informatique classique à un service infonuagique.

Sur la base de la documentation actuelle, les éléments suivants ont été identifiés comme appropriés pour la mise en œuvre du système de sécurité. Stieninger (2014) mentionne quatre éléments relatifs à cette mise en œuvre :

Sécurité des données : l'amélioration des normes de sécurité des données joue un rôle crucial pour les organisations dans le processus de décision d'adoption de solutions infonuagiques ;

Confiance envers le fournisseur : la confiance des fournisseurs de services était essentielle pour l'adoption d'une solution d'infonuagiques ;

Accords contractuels : les accords contractuels définissent certains niveaux de service que les fournisseurs de services d'infonuagique doivent respecter. Ces accords renforcent la confiance en définissant des normes de sécurité.

Localisation géographique : L'emplacement géographique où les données sont stockées ou traitées joue un rôle majeur dans le processus de sélection d'un fournisseur d'infonuagique. Cela s'explique, d'une part, par les différences entre les réglementations légales et, d'autre part, par la qualité et la disponibilité perçues des services de soutien.

2.3.2 Intégration TI / TO

Selon Ropartz (2017), étant profondément différents au niveau des objectifs **métiers**, des **solutions technologiques**, des **standards**, de l'**organisation** et des **compétences**, les systèmes d'information opérationnels (TO) et les systèmes d'information d'entreprise (TI) sont longtemps restés isolés l'un de l'autre. Cette situation s'inscrivait dans une logique de spécialisation des processus, mais également de sécurisation des activités opérationnelles des sites industriels. Les TI ont le mandat de centraliser les informations de pilotage de l'entreprise et à automatiser les processus de soutien, tandis que les TO ont comme objectif de contrôler les équipements industriels et d'exécuter les processus de production.

Ces systèmes reposaient également sur des technologies fondamentalement différentes. Le monde de TI, d'un côté, repose fortement sur l'intelligence logicielle et sur des standards très ouverts. Par contre, le monde TO est fortement dépendant de dispositifs physiques (capteurs, automates, superviseurs, etc.) et a longtemps privilégié des technologies propriétaires. Les TI exigent des compétences en informatique, en numérique, en données ou encore en sécurité réseaux. Par contre, les TO font appel quant à eux à des compétences en automatisation industrielle, en contrôles avancés ou en génie des procédés. Ces deux univers avaient peu de points communs à leur création et ils n'ont pas été amenés à communiquer largement ni à partager leur savoir-faire depuis lors.

Cependant, selon Desai (2016), l'arrivée des solutions IIoT/analytique force l'intégration de ces deux univers parallèles. Compte tenu du positionnement de la fonction maintenance (1.1.1) par rapport à la production ou aux services financiers, leurs ressources de soutien TI sont fréquemment limitées ou priorisées. Tout risque important perçu lors de l'introduction de nouvelles technologies, par le responsable TI, peut alors devenir un frein majeur.

Tableau 2.1 Nouvelles préoccupations TI/TO

Nouvelles préoccupations pour TI :	Nouvelles préoccupations pour TO :
<ul style="list-style-type: none"> • Un impact physique plus important (effets d'un incident sur un système industriel) • Risques physiques et sécurité • Systèmes obsolètes ou personnalisés 	<ul style="list-style-type: none"> • Risques physiques et sécurité – piratage • Contrôle de la productivité et de la qualité • Fuites de données • Travailler avec TI

La principale préoccupation sous-jacente des deux parties est de conserver le contrôle des systèmes et des machines, ainsi que l'intégrité/sécurité des informations visant les employés, les clients et l'entreprise. Il y a effectivement un risque d'interférence des TI dans l'analyse des données brutes. La tentation est parfois forte d'utiliser des modèles conventionnels non adaptés aux types d'équipements en cause et aux performances souhaitées.

2.3.3 Retour sur investissement incertain

Bien que les statistiques sur l'intérêt de la maintenance prévisionnelle soient impressionnantes, elles sont extrêmement variables en fonction de l'industrie, de la culture et des intervenants. Par exemple, selon Robertson et Jones (2004), le budget de la maintenance peut varier de 2 % à 90 % du budget des opérations en fonction des domaines et services, ce qui pourrait expliquer la variabilité statistique observée.

Tableau 2.2 Taux de succès de projets informatiques (2011-2015)
Traduit de : Chaos Report (2015)

	Réussi	Contesté	Échoué	Total
Très grand	6%	51%	43%	100%
Grand	11%	58%	30%	100%
Moyen	12%	62%	26%	100%
Modéré	21%	54%	24%	100%
Petit	61%	32%	7%	100%

De plus, on doit tenir compte des risques liés aux taux de réussite des projets informatiques en fonction de leur ampleur. Ce tableau du Chaos Rapport (2015) portant sur plus de 25 000 projets informatiques indique que le taux de projets contestés ou échoués passe de 94 % pour les très grands projets à 76 % pour les projets moyens et 39 % pour les petits projets (2011-2015).

Selon le livre blanc du forum Consortium Adopte IoT (2017), un retour sur investissement incertain peut être préoccupant étant donné que certaines solutions technologiques peuvent être très onéreuses, voire chiffrées dans les millions de dollars à l'application.

2.3.4 Expertise technique ou complexité

Selon Stieninger et coll. (2014), la notion d'expertise technique semble répondre à la perception de complexité du système. La complexité se définit comme « le degré auquel une innovation est perçue comme relativement difficile à comprendre et à utiliser ». Plus il faut du temps pour comprendre et mettre en œuvre une innovation, plus il est probable que la complexité devienne un obstacle à l'adoption d'une nouvelle technologie. C'est pourquoi la complexité affecte généralement l'adoption des technologies. Bien qu'une étude auprès de PME ait toutefois révélé que les experts ne considéraient pas l'infonuagique comme une

technologie très complexe à mettre en œuvre, son aspect prévisionnel peut apeurer plusieurs responsables en entreprise. Cet aspect inclut :

Frustration : Difficulté perçue à utiliser et à comprendre un système ;

Flexibilité : Rigidité de la forme d'interaction ;

Adéquation des tâches : Capacité d'obtenir que le système s'acquitte de tâches importantes ;

Conformité aux attentes : la conformité aux attentes est une nécessité dans les solutions infonuagiques et, par conséquent, cet élément a été choisi comme indicateur de la complexité ;

Selon Stieninger (2014), l'infonuagique présente parfois un risque de conflit avec la philosophie de l'entreprise. Il faut faire la distinction entre compatibilité technique et compatibilité organisationnelle. En ce qui concerne la compatibilité organisationnelle, les principaux problèmes qui se posent aujourd'hui sont la compatibilité des processus et des données, car, en raison du manque de normalisation, les changements de fournisseurs peuvent entraîner des coûts supplémentaires pour la migration et l'intégration du système. En conséquence, une compatibilité (technique et opérationnelle) accrue influence positivement l'intention d'adoption et l'adoption réelle de l'infonuagique. Il souligne à cet égard :

Échange de données : l'interchangeabilité des données comme un défi technique important.

Il garantit aux clients d'extraire facilement leurs données d'un fournisseur d'infonuagique ;

Intégrabilité des processus : du point de vue organisationnel, ce point est identifié comme l'élément le plus important ;

Interopérabilité des fournisseurs : dans la mesure où l'absence de standardisation peut entraîner des effets de verrouillage empêchant les clients de passer d'un fournisseur à un autre en raison de coûts supplémentaires liés à la migration et à l'intégration. Cette interopérabilité est facilitée par le recours à des normes largement acceptées.

2.3.5 Risque dû au fournisseur

Selon Opara-Martins et coll. (2016), plus l'utilisation de l'infonuagique est utilisée pour les informations stratégiques de l'entreprise, plus les risques dus au fournisseur doivent être tenus en compte. Le tableau suivant présente une étude réalisée en 2016 au Royaume-Uni sur 104 répondants d'entreprise.

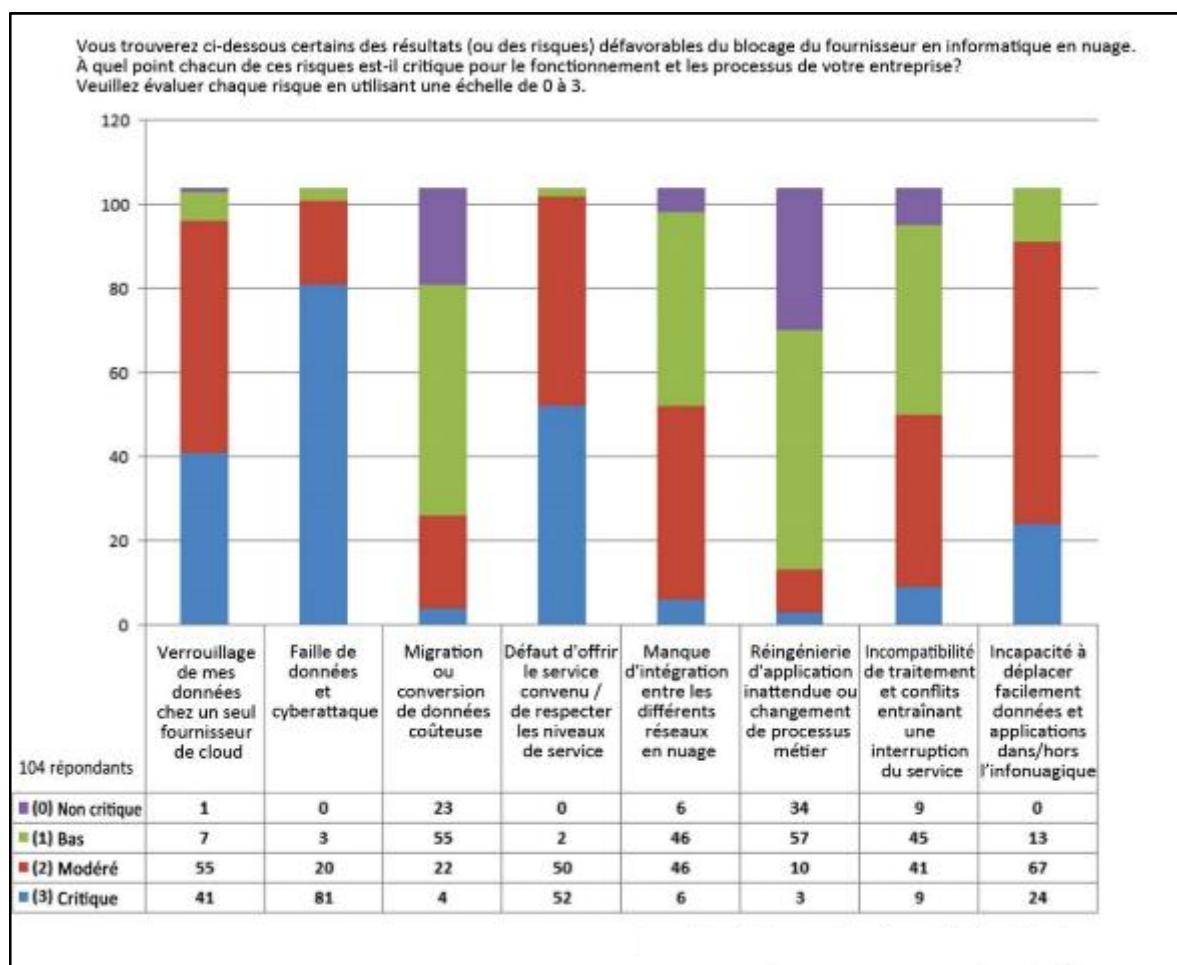


Figure 2.6 Criticité des résultats défavorables du blocage du fournisseur
Traduit de Opara-Martins et all. (2016)

2.3.6 Maturité des capacités d'analyses

Bien que l'analyse prévisionnelle soit un objectif, on doit tenir compte de la maturité d'analyse interne à l'entreprise et de la démarche de transition vers l'analyse prévisionnelle. Le modèle de Bersin (2014) permet d'évaluer le niveau de maturité des capacités d'analyses d'une entreprise. Beaucoup de PME en sont encore au niveau des rapports opérationnels ou encore moins, des rapports opérationnels incomplets ou inexistants.

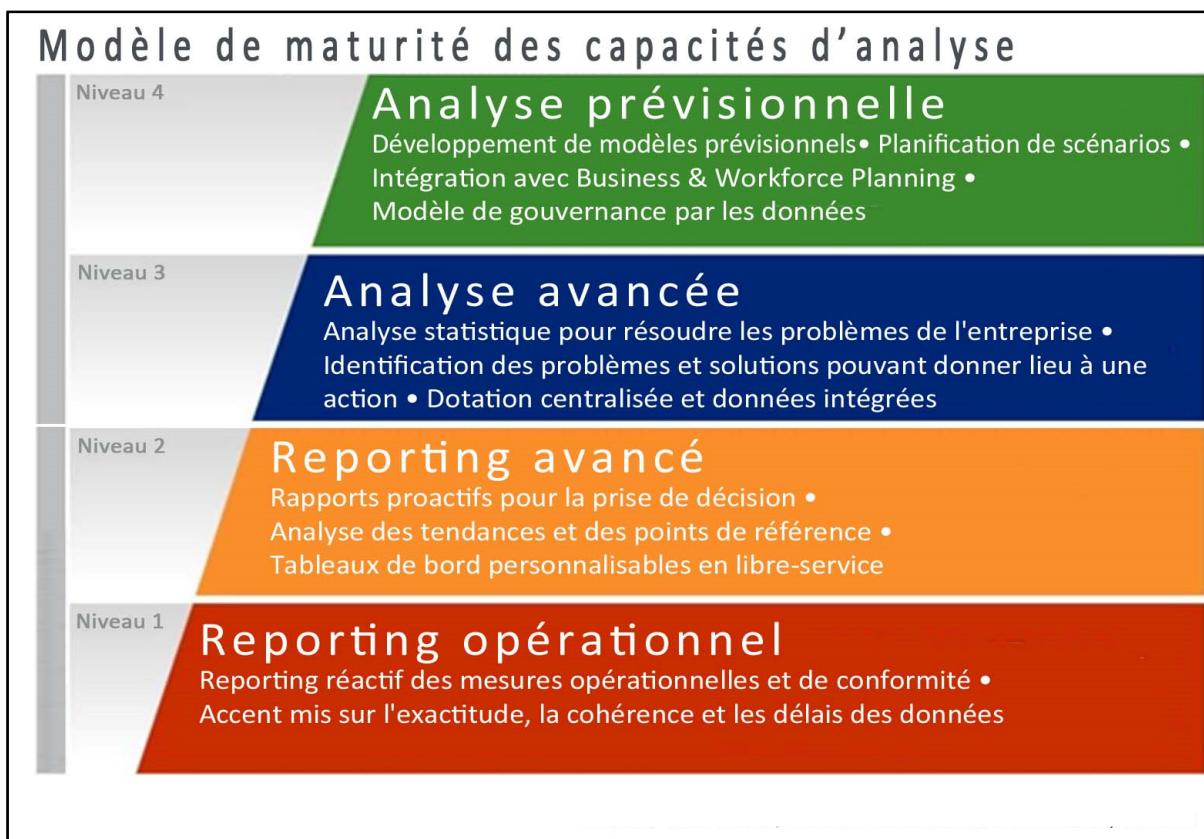


Figure 2.7 Modèle de maturité des capacités d'analyse
Traduit de : Josh Bersin (2014)

Notons que l'analyse prévisionnelle repose principalement sur les IIoT et le retour d'expérience incluant la description des pannes. Bien que le suivi des IIoT soit rapide après l'installation des capteurs, le traitement des retours d'expérience d'événements suivis (particulièrement les pannes) peut être beaucoup plus long. Ce délai et la disponibilité des

lectures IIoT pourraient être utilisés pour augmenter la maturité des capacités d'analyse de l'équipe de maintenance au moins vers le niveau 1.

2.4 Décision d'implantation d'une approche prévisionnelle

Selon Talmizie (2017), la décision d'implantation d'une approche prévisionnelle via solution IIoT/analytique serait basée sur un déséquilibre favorable à la perception des motivateurs par rapport aux inhibiteurs. Un déséquilibre défavorable pourrait expliquer l'accueil nuancé des entreprises (1.4.2) et le rejet de 80 % des projets d'implantation étendue de la maintenance 4.0 en 2022.

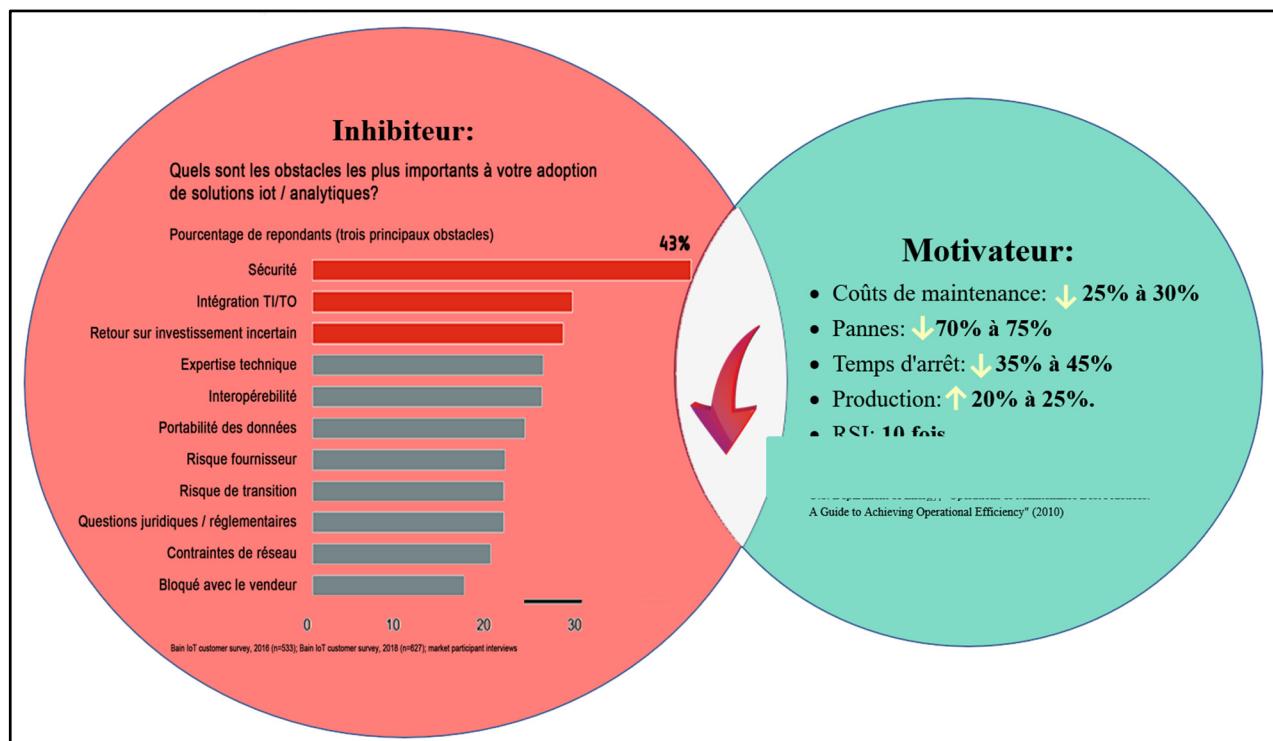


Figure 2.8 Modèle de décision d'implantation d'une approche prévisionnelle

Notons que ce modèle s'applique sur la décision d'implantation. Pour ce qui est de l'acceptation de la technologie et les changements comportementaux nécessaires, le lecteur devrait plutôt se référer au chapitre trois.

2.5 Récapitulatif

La revue de littérature a présenté l'importance stratégique de la maintenance industrielle, les coûts et les impacts. Puis, elle a décrit les différentes politiques de sa réalisation et l'importance de l'équilibre entre celles-ci. Le sous-chapitre 2.4 porte sur la décision d'implantation de la maintenance prévisionnelle. On y présente son grand intérêt, mais aussi son accueil mitigé et les obstacles à son adoption. On y conclut que la réticence à l'adoption de cette politique serait basée sur un déséquilibre défavorable entre la perception des motivateurs et des inhibiteurs.

2.6 Conclusion

Bien que la maintenance 4.0 offre de nombreux avantages concurrentiels, environ 20 % seulement des entreprises interrogées s'attendent à mettre en œuvre des solutions à grande échelle d'ici 2022.

Plusieurs sondages ont été réalisés sur le sujet. Il est intéressant de remarquer qu'il y a peu de commentaires bloquants tels que : « N'y crois pas » et « Pas d'intérêt ». Par contre, on peut regrouper les inhibiteurs à la mise en œuvre de cette technologie en trois classes : les ressources humaines, les risques financiers et la technologie.

CHAPITRE 3

ACCEPTATION DE LA TECHNOLOGIE

3.1 Introduction

Le chapitre deux a porté sur la décision d’implantation de maintenance 4.0. On y détaille les inhibiteurs qui bloquent la décision d’implanter une démarche de maintenance 4.0. Le chapitre trois portera sur l’acceptation de cette nouvelle approche de maintenance utilisant, entre autres, la technologie IIoT.

Selon Johansen (2017), une enquête de Cisco montre que 60 % des initiatives IoT stagnent au stade de la preuve de concept et que seulement 26 % des entreprises ont eu une initiative IoT qu’elles considéraient comme un succès complet. De plus, un tiers de tous les projets achevés ont été considérés comme un échec. Dans ses principales conclusions, le rapport de Cisco rapporte l’importance du facteur humain.

L’IoT et la maintenance 4.0 peuvent sembler être une question de technologie, mais les facteurs humains tels que la culture, l’organisation et le leadership sont essentiels au succès du projet.

L’implantation d’un mode de maintenance 4.0 peut facilement être perçue comme une rupture technologique entraînant un sentiment de perte de contrôle ou de dévalorisation de leurs travaux par le personnel technique et les gestionnaires de maintenance. On ne peut pas tenir pour acquis que cette nouvelle technologie et son mode d’implantation seront acceptés d’emblée par les équipes de maintenance et la gestion de premier niveau. Selon Sichel (1997), la faible utilisation des systèmes installés a été identifiée comme l’un des principaux facteurs à l’origine du « paradoxe de la productivité », qui se traduit par un rendement médiocre des investissements organisationnels dans les technologies de l’information.

L'utilisation d'un modèle d'acceptation de la technologie peut, à priori d'une implantation, aider à ajuster les modalités d'implantation ou le choix de la technologie et ainsi optimiser la probabilité d'acceptation.

3.2 Modèle d'acceptation de la technologie TAM2

Venkatesh, V. & All. (2000) propose un modèle d'acceptation technologique TAM2 qui s'applique principalement aux systèmes d'information. Il a été conçu pour prédire les décisions d'adoption de la technologie par les utilisateurs. Le pointage indique la corrélation entre le concept prédecesseur et le concept successeur.

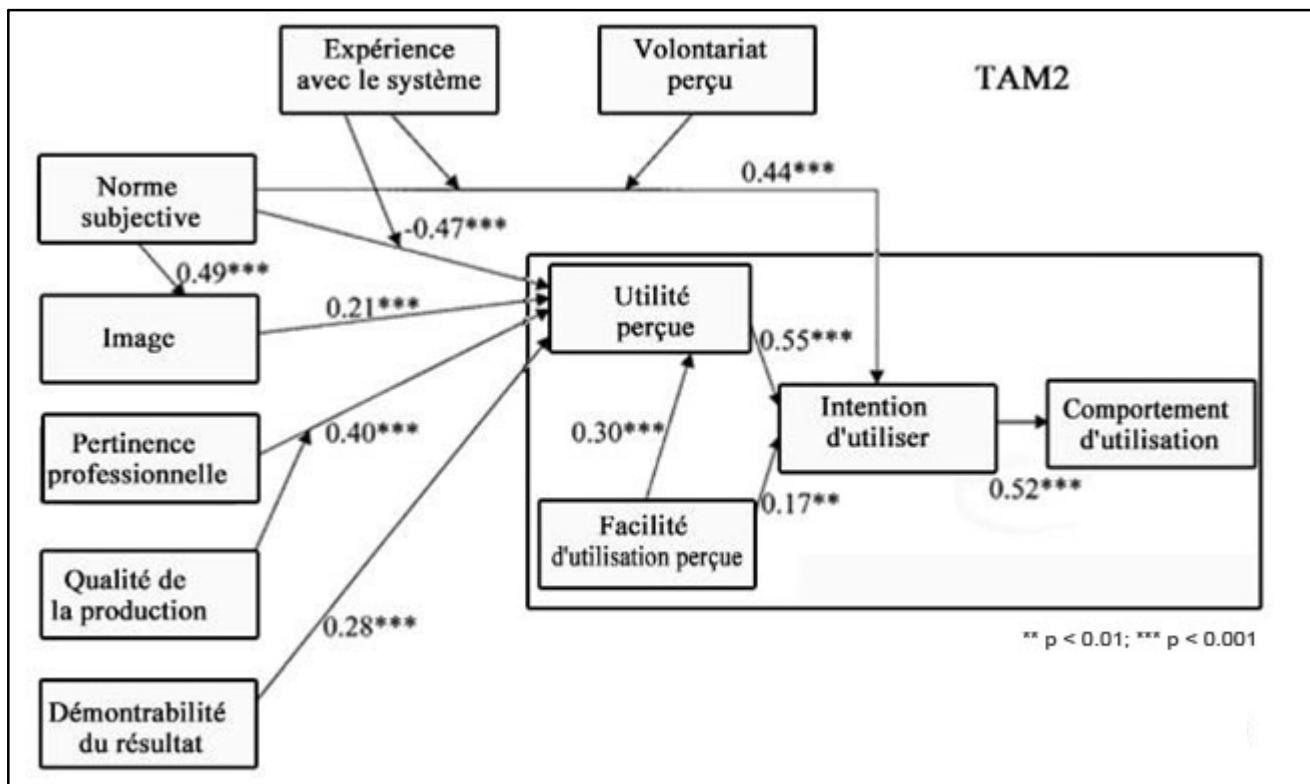


Figure 3.1 Résultats rapportés du TAM2 (n=468)
Traduit de Venkatesh, V. & All. (2000)

Tableau 3.1 Concept TAM2
Traduit de Venkatesh (2000)

Concept	Définition	Type
Norme subjective	La perception d'une personne selon laquelle la plupart des gens qui sont importants pour elle pensent qu'elle devrait ou ne devrait pas adopter le comportement en question.	Indépendant
Image	La mesure dans laquelle l'utilisation d'une innovation est perçue comme améliorant le statut de l'individu dans son système social.	Indépendant
Pertinence professionnelle	La perception d'un individu concernant le degré d'application du système cible à son travail.	Indépendant
Qualité de la production	Le degré auquel une personne croit que le système exécute bien les tâches de son emploi.	Modérateur
Démonstrabilité des résultats	La tangibilité des résultats de l'utilisation de l'innovation.	Independent
Expérience avec le système	Le temps écoulé depuis la première utilisation d'une technologie par un individu.	Modérateur
Volontariat perçu	La mesure dans laquelle les adoptants potentiels perçoivent la décision d'adoption comme étant non obligatoire.	Modérateur
Utilité perçue	La mesure dans laquelle une personne croit que l'utilisation d'un système particulier améliorerait son rendement au travail.	Indépendant
Facilité d'utilisation perçue	Le degré auquel une personne croit que l'utilisation d'un système particulier serait sans effort.	Indépendant
Intention d'utiliser	Mesure de la volonté d'un individu à utiliser le système	Dépendant
Comportement d'utilisation	Mesure de l'utilisation du système	Dépendant

Selon Marikyan, D. (2020), pour le TAM, l'acceptation de la technologie est un processus en trois étapes, dans lesquelles des facteurs externes (caractéristiques de conception du système) déclenchent des réponses cognitives (facilité d'utilisation perçue et utilité perçue), qui, à leur tour, forment une réponse affective (attitude envers l'utilisation de la technologie/intention), influençant le comportement d'utilisation. Bien que la large application de la TAM ait confirmé la robustesse de la théorie (elle explique en moyenne environ 40 % de la variance de l'acceptation de la technologie), les auteurs du modèle ont cherché à augmenter encore son pouvoir prévisionnel.

En englobant à la fois les facteurs d'influence sociale (c.-à-d. la norme subjective, le caractère volontaire de l'utilisation et l'image) et les facteurs cognitifs (c.-à-d. l'évaluation de la

pertinence du travail, la preuve des résultats, la qualité de la production et la facilité d'utilisation perçue), le modèle TAM2 fournit un compte rendu détaillé des principaux déterminants du jugement sur l'utilité de la technologie. Il a été confirmé que l'utilité perçue était le prédicteur le plus fort de l'intention d'utilisation, avec une taille d'effet de 55 % en moyenne (Venkatesh, 2000).

3.3 Projet Opale-PC

Il serait intéressant d'utiliser l'outil TAM2 pour optimiser l'acceptabilité d'un système d'entrée de gamme de maintenance 4.0. Pour vérifier si ce modèle s'applique bien dans le milieu de la maintenance industrielle, on applique TAM2 sur une implantation technologique réalisée à la STM entre les années 2008 et 2017 et on vérifiera la concordance avec la réalité observée. Le cas échéant, le modèle pourra être appliqué à la proposition de différent système pour anticiper son acceptabilité.

3.3.1 Contexte

En 2008, la direction de l'entretien des équipements fixes (EÉF) du Métro de Montréal a entrepris le remplacement du système de gestion de l'entretien des équipements. Cette direction comptait plus de 500 employés répartis en 12 corps de métier et entretenait plus de 54 000 équipements dans 32 systèmes pour 4 G\$ d'actif.

Le système de gestion de l'entretien (GUIDE, base de données Supra) datait de 1980 et fut implanté en 1989. Il disposait de peu de fonctionnalité de maintenance. Neuf autres bases de données (principalement sur MS Access) avaient « officiellement » été créées depuis pour répondre aux besoins opérationnels. Une trentaine d'autres bases ou tableurs « clandestins » étaient utilisés régulièrement et étaient nécessaires aux opérations. Cette situation nécessitait, pour la direction, un effort considérable afin de maintenir ces systèmes et exposait à des pertes importantes d'informations opérationnelles.

La proposition de remplacement du service des technologies de l'information (STI) visait comme objectifs principaux de mettre à jour les données concernant les équipements et de s'orienter vers un entretien prévisionnel dans le but d'augmenter la fiabilité du métro et de minimiser les coûts (STM Solution d'affaires, 2005). Elle bonifiait essentiellement les fonctions offertes par le système GUIDE. Bien que cette solution de remplacement répondît aux besoins corporatifs/financiers et d'une partie des besoins des opérations, l'Ingénierie de maintenance a informé la direction EÉF que cette solution nécessitait un système complémentaire plus performant pour les opérations.

Par exemple, pour la saisie du retour d'expérience, le personnel technique devait inscrire les codes numériques d'action sans aide-mémoire. Les retours techniques étaient à 96 % : 998 (fait) ce qui limitait, pour l'Ingénierie de maintenance, les possibilités d'analyses et d'améliorations. On retrouve, en annexe II, un exemple de la solution développée qui informe les intervenants sur l'état des équipements et son historique. Elle permet la saisie automatique du retour technique, a économisé environ 3000 h/an d'un travail abrutissant pour les commis et améliore l'information pour l'Ingénierie. La solution retenue, nommée Opale PC, a intégré toutes les autres bases d'informations utilisées par EÉF et est gérée par l'Ingénierie de maintenance.

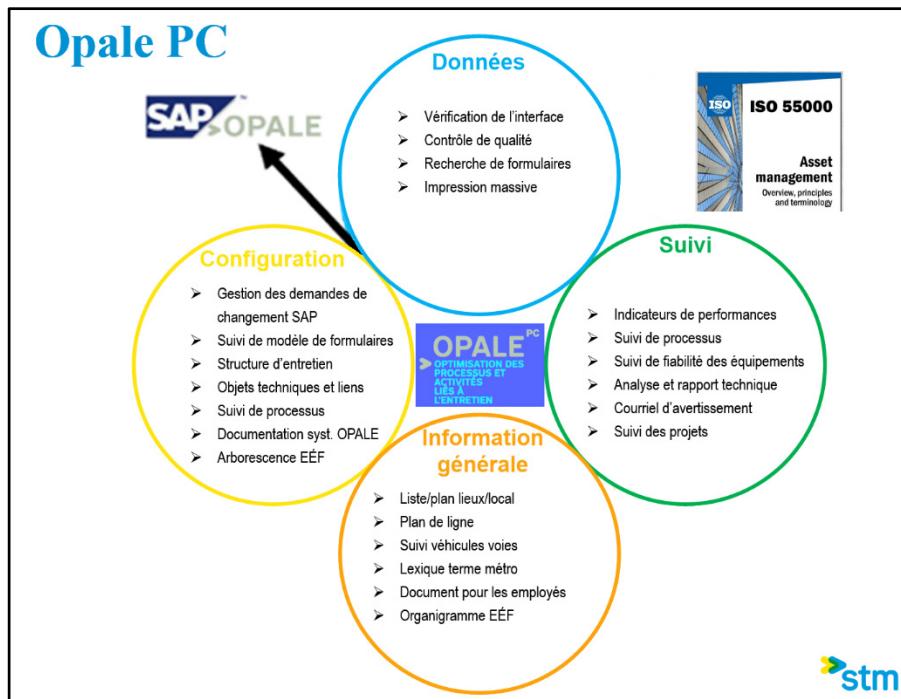


Figure 3.2 Application Opale-PC
Tiré de Vadeboncoeur, R (2014)

3.3.2 Défis d'acceptation

L'enjeu du projet Opale-PC était d'identifier, uniformiser, centraliser, partager et sécuriser l'information essentielle à la maîtrise de la maintenance et en particulier de la fiabilité pour EÉF.

Compte tenu de l'importance opérationnelle de ces informations, plusieurs contremaîtres-utilisateurs étaient très réticents à « perdre le contrôle » sur celles-ci. Il devenait important que la perception de risque se transforme en opportunité pour eux et que les intervenants y participent volontairement. L'objectif était de fournir un outil qui pourrait relativement rapidement répondre et s'adapter aux besoins des différents intervenants et ainsi minimiser le risque de nouveaux systèmes « clandestins ».

3.3.3 Développement et implantation

La réalisation du projet Opale PC a été découpée en sept étapes et s'est appuyée sur le mode Agile. L'étape un a été réalisée en premier. Les étapes deux à cinq étaient réalisées sous forme de sprint. Le temps de réalisation des sprints a diminué de trois mois à trois semaines. Finalement, les étapes six et sept ont été complétées en respectant le rythme des utilisateurs.

Liste des étapes de réalisation :

1. Développer une solution de progiciel de maintenance opérationnelle qui contiendrait les modules et les fonctions communes tels :
 - Gestion de la sécurité et des rôles ;
 - Gestion de la distribution ;
 - Uniformisation des listes, pages et rapports ;
 - Gestion des liens entre les objets ;
 - Contrôle de la qualité et statistiques d'utilisation.
2. Identifier et prioriser les bases de données, tableurs ou fonctions ayant le plus d'irritants tels que :
 - Coordination et communication des informations opérationnelles ;
 - Systèmes critiques vétustes et non soutenus ;
 - Besoin critique non comblé ou non adapté, impact direct sur les opérations ;
 - Système nécessitant beaucoup de ressources pour l'alimenter (ex. : retour technique).
3. Sélectionner un influenceur pour un module/fonction sélectionné.

Généralement, c'est un contremaître ou un chef d'équipe intéressé par la conception du module et bien intégré au milieu. Son rôle sera de :

- Participer à la définition des caractéristiques, occasions, contraintes du nouveau module ;
- Tester les nouvelles fonctions ;
- Sélectionner un groupe cible (intéressant et intéressé) pour les premières implantations ;

- Cautionner et soutenir l'implantation du module.
4. Développer et tester le module
5. Implanter le module pour la section cible, ajuster au besoin et suivre les statistiques d'utilisation.
6. Implanter le module pour les autres des utilisateurs.
7. Fermer progressivement les autres systèmes/méthodes concurrents au module.

3.3.4 Résultat

Bien que conçu initialement uniquement pour la direction entretien des équipements fixes (EÉF), le projet Opale PC a vite débordé de ses frontières. En 2016, il comptait 246 utilisateurs, dont environ 100 utilisateurs réguliers qui l'utilisaient plus de 15 minutes par mois. Le personnel de maintenance EÉF représentait 45 % de ces utilisateurs réguliers, les autres provenant de l'Ingénierie à 20 %, du Service à la clientèle à 15 % et du Centre de contrôle à 14 %.

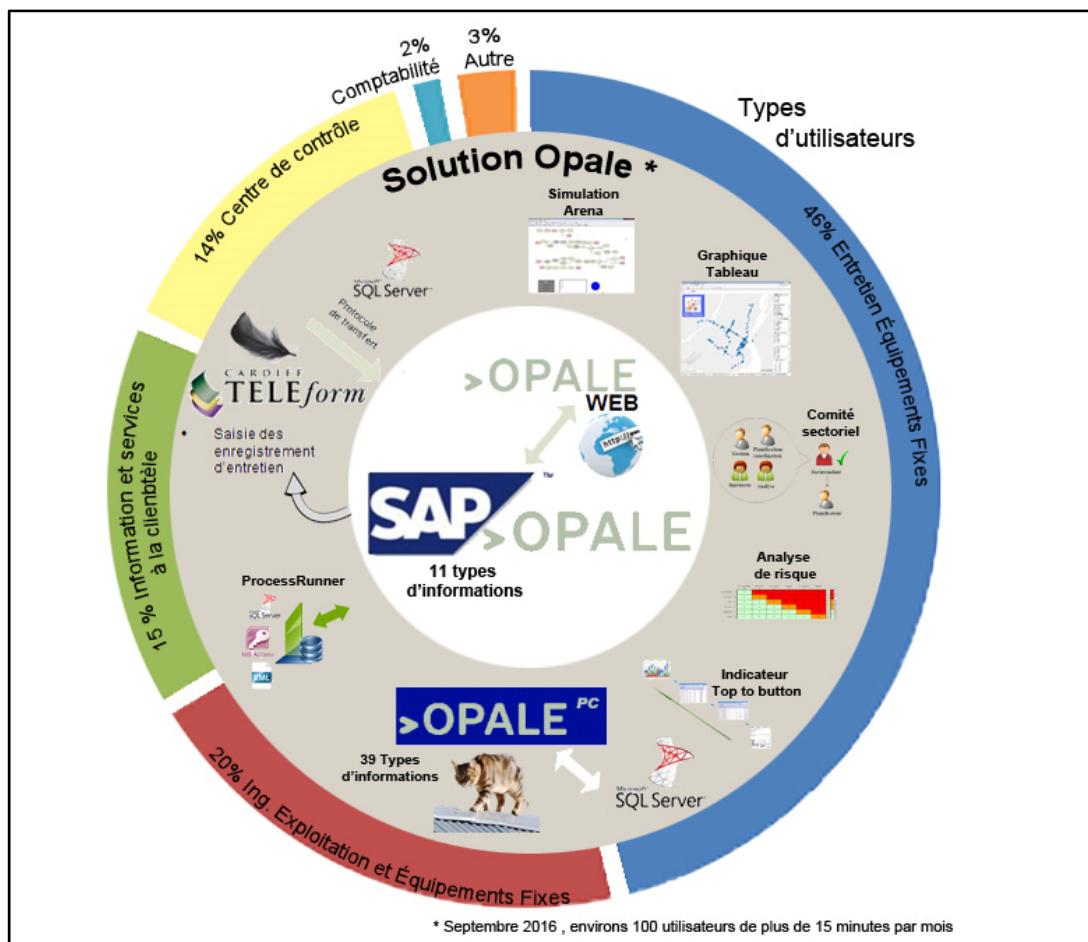


Figure 3.3 Répartition des utilisateurs d'Opale-PC
Tiré de Vadeboncoeur, R. (2016)

À la fin du projet, 52 modules/fonctions ont été implantés réduisant le temps de réalisation de la partie administrative opérationnelle d'environ 40 %. La durée moyenne de conception d'un module est passée de 80 heures sur une période de trois mois, à 20 heures sur une période de trois semaines.

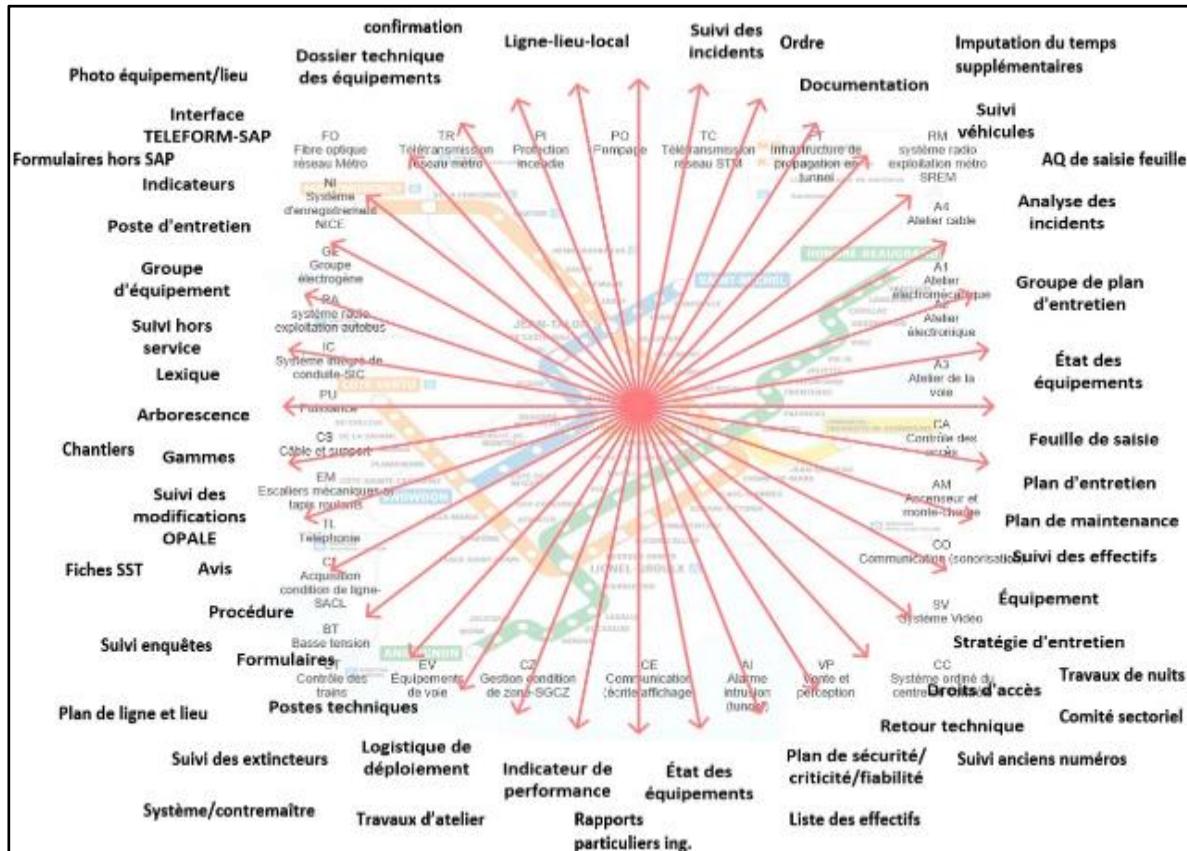


Figure 3.4 Modules/fonctions développés dans l'application Opale PC
Tiré de Vadeboncoeur, R. (2016)

3.3.5 Application du modèle TAM2 sur Opale PC

Le projet Opale PC a été qualifié de succès, notamment par le Comité de direction de la STM, et a été présenté à plusieurs organisations externes. Bien que réalisé dans un milieu de maintenance industrielle impliquant de nombreux secteurs et corps de métier, il est intéressant de décrire la stratégie adoptée pour le projet Opale PC par rapport à chaque concept TAM2 et d'en évaluer l'impact (variant de --- à +++). Puis d'appliquer ces évaluations sur le modèle TAM2.

Tableau 3.2 Concepts TAM2 appliqué au projet Opale PC

Concept	Stratégies d'implantation d'Opale PC	Impact
Norme subjective	Implication directe d'un influenceur convaincu du besoin et de la solution proposée. Cette condition était nécessaire pour la réalisation d'un module.	++
Image	Appui des gestionnaires. Des employés de la section cible présentaient les résultats au comité de gestion de la direction. D'autres groupes ont régulièrement manifesté un intérêt à mesure que les résultats étaient présentés est un exemple de formulation plus positive.	++
Pertinence professionnelle	Sélection de l'ordre des modules en fonction de l'amélioration des irritants opérationnels. Les demandes étaient régulièrement portées par les gestionnaires de 2 ^e niveau.	+++
Qualité de la production	L'influenceur teste et consulte ses collègues pour s'assurer que les nouvelles fonctions testées répondent aux besoins opérationnels.	++
Démontrabilité des résultats	Suivi statistique et partage des résultats. Chaque module était réalisé par itération normalement plus simple, plus adaptée et avec des livrables opérationnels rapidement visibles plutôt qu'avec une solution globale.	++
Expérience avec l'application	L'implantation a été progressive, l'apprentissage de chaque nouveau module se basait sur les expériences passées.	+
Volontariat perçu	La sélection de l'influenceur et de la section cible était sur une base volontaire et intéressée. Souvent, ce fut l'influenceur qui a demandé à participer au projet.	++
Utilité perçue	Étant donné que la priorisation des modules visait à minimiser les irritants opérationnels, normalement l'utilité du nouveau module était soulignée par l'influenceur.	++
Facilité d'utilisation perçue	Un effort de soutien était fourni lors de la première utilisation de l'application par un employé. Par la suite, étant donné que la même logique était utilisée, chaque nouveau module ne nécessitait qu'une brève présentation par l'influenceur.	+
Intention d'utiliser	Les nouveaux modules étaient généralement bien acceptés et utilisés.	+++
Comportement d'utilisation	Le taux d'utilisation de l'application très fort. Forte demande pour inclure de nouveaux modules par les utilisateurs, même externe au Centre EÉF. Par exemple, une application de suivi des états des équipements par le service à la clientèle.	+++

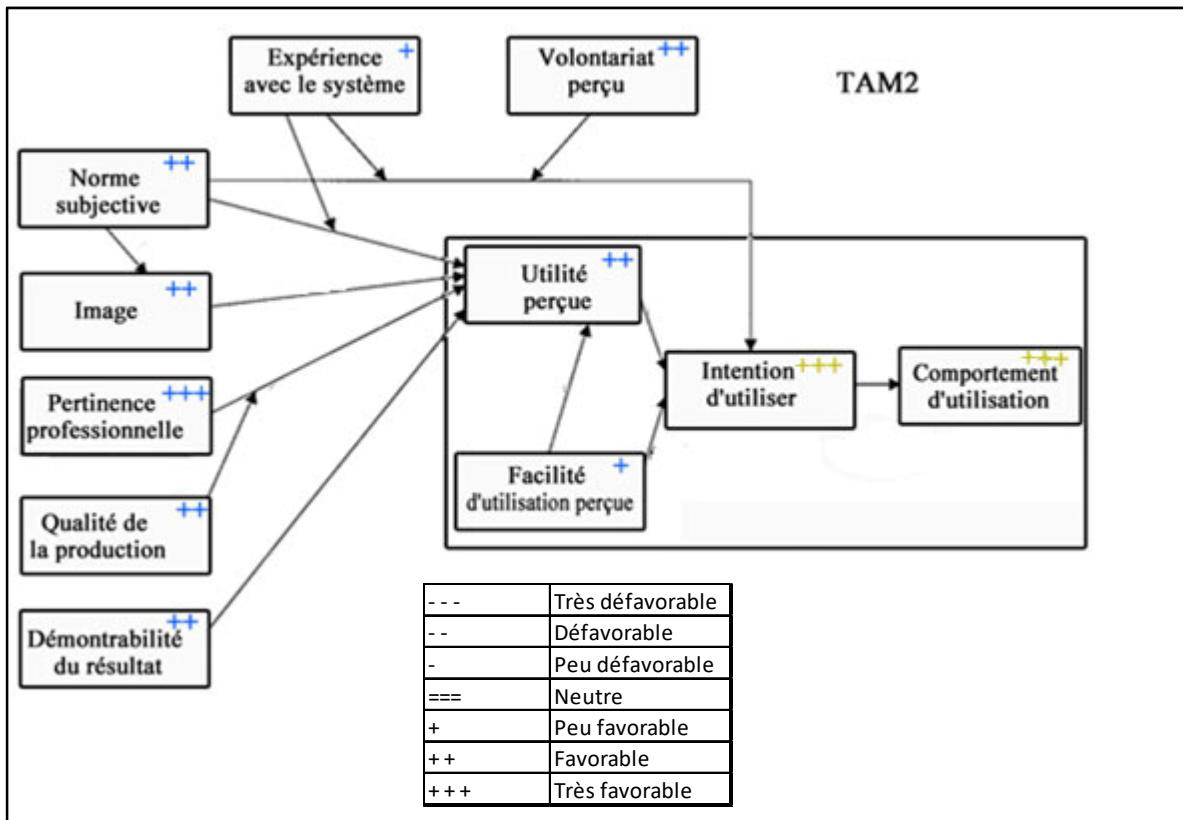


Figure 3.5 Résultat de TAM2 appliqué au projet Opale PC

Le modèle TAM2 appliqué sur les stratégies d'implantation du projet Opale PC corrobore le succès obtenu avec le projet. Une démarche semblable pourrait être un outil d'optimisation précieux lors de la conception d'un système de maintenance 4.0 d'entrée de gamme.

3.4 Récapitulatif

En plus des inhibiteurs à la décision d'implanter la maintenance 4.0 (chapitre deux), une étude rapporte que 60 % des initiatives IoT stagnent au stade de la preuve de concept et que seulement 26 % sont considérées comme un succès complet. Ce chapitre présente un projet de maintenance dont la complexité pourrait se comparer à une implantation 4.0 et qui a connu un succès. L'utilisation d'un modèle d'acceptation de la technologie (TAM2) permet de mieux évaluer à priori l'impact des stratégies d'implantation utilisées sur l'acceptation des utilisateurs

et de les ajuster au besoin. Étant donné que les deux types d'implantation sont relativement semblables, ces stratégies pourraient aider à structurer la démarche d'introduction à la maintenance 4.0 et en faciliter le succès.

3.5 Conclusion

L'utilisation du modèle TAM2 sur le projet Opale PC a permis d'identifier et classifier les stratégies d'implantation d'un projet technologique en maintenance. On y retrouve les liens entre les stratégies d'implantation et l'objectif d'acceptation d'une nouvelle technologie. Il serait intéressant d'utiliser ces stratégies dans la conception d'un système de maintenance 4.0 d'entrée de gamme.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

4.1 Contexte

Il a été observé que, malgré les avantages de la maintenance 4.0, celle-ci tarde à s'implanter en industrie. L'objectif de ce mémoire est de documenter les contraintes à son implantation et de proposer une démarche la facilitant. Les chapitres cinq et six proposeront un système d'entrée de gamme en maintenance 4.0. Il est préalablement intéressant de mieux comprendre ce monde particulier qu'est la maintenance industrielle.

4.1.1 Positionnement de la maintenance

Les principales unités opérationnelles des industries sont usuellement les achats, la production, les ventes et la finance, ce sont des fonctions relativement normées et répétitives. D'un autre côté, les changements majeurs dans la production sont réalisés, habituellement, par des groupes projets. Selon NF ISO 21502, les projets sont des ensembles uniques de processus, constitués d'activités coordonnées et maîtrisées, ayant des dates de début et de fin, et entreprises pour atteindre les objectifs du projet.

La maintenance est un service support aux opérations. Elle peut se définir comme le fait de maintenir ou de rétablir un équipement de production dans un état défini en amont afin que celui-ci soit en mesure d'assurer le service prévu durant toute le cycle de vie de l'équipement. Elle permet non seulement de limiter les pannes et de prévenir les défaillances, mais elle aide également à améliorer la productivité et la rentabilité d'une usine. Cependant, il est difficile de mesurer l'intérêt financier ou opérationnel du service de maintenance, car son principal livrable est un non-événement, les pannes. De plus, il doit parfois perturber les services « rentables ». C'est souvent par défaut qu'on en mesure l'importance (voir 1.1.4 Enjeux de la maintenance).

Selon Schermerhorn, J. & all. (2018), la maintenance serait une adhocratie qui se caractérise comme suit :

- Des politiques, des règles et des procédures peu nombreuses (ou mal documentées) ;
- Un processus de prise de décision extrêmement décentralisé (souvent, c'est l'ouvrier qui décide de l'intervention à faire) ;
- Une spécialisation horizontale très poussée : chaque membre de l'unité peut être un spécialiste dans son domaine ;
- Des niveaux hiérarchiques peu nombreux ;
- Presque aucun type de contrôle technique formel.

Tenant compte des différents équipements, des conditions d'utilisation, des métiers et de la culture organisationnelle, il est généralement admis, dans le milieu industriel, qu'il n'y a pas deux environnements de maintenance identiques. À titre d'ingénieur principal maintenance, l'auteur a eu à bloquer ou fortement moduler plusieurs des solutions miracles fortement recommandées qui avaient eu des succès ailleurs parce qu'elles n'étaient applicables telles quelles dans le contexte de la STM.

On peut comprendre la réticence des gestionnaires de maintenance face aux promesses conditionnelles (voir 2.2 Intérêts de la maintenance 4.0), d'autant plus que l'on parle souvent de centaines de milliers de dollars, de changement majeur en maintenance et d'un risque de dépassement technologique de l'équipe (expertise).

4.2 Projets d'implantation en maintenance

L'auteur a été impliqué, à titre de gestionnaire et/ou d'ingénieur principal maintenance à de nombreuses implantations technologiques ou administratives durant ces 30 dernières années.

Ce sous-chapitre présente les contextes, démarches et résultats de certaines d'entre elles puis un résumé de diverses tendances observées. L'objectif étant de dégager des observations qui soutiendront la proposition d'un système de maintenance 4.0 d'entrée de gamme.

4.2.1 Démarche de nivellation de charge de travail — nettoyage

Référence : Vadeboncoeur, R. (1996)

Contexte

En 1996, l'entretien sanitaire des stations de métro nécessitait de répartir 132 employés pour le nettoyage de 67 stations. On devait, entre autres, tenir compte de la dimension de la station (Berri UQAM vs Île-Sainte-Hélène), du type de clientèle (proximité d'une école vs centre-ville) et des types de surface à nettoyer. Deux ingénieurs industriels avaient tenté de répartir la charge pendant un an avant de déclarer forfait. De plus, le syndicat avait averti qu'il contesterait les résultats de ce type d'étude. La relance du projet nécessitait donc un changement d'approche pour en favoriser l'acceptation dans le milieu.

Démarche d'implantation

Six gestionnaires et 15 préposés au nettoyage, dont deux chefs syndicaux, se sont portés volontaires pour évaluer les charges de travail par station. Ils devaient évaluer, à leurs manières, trois stations et la station Rosemont, celle-ci étant retenue comme station étalon. Chaque station (sauf Rosemont) a été évaluée trois fois en moyenne. Le seul critère est qu'ils s'engageaient à ne pas communiquer entre eux sur le sujet durant l'étude. Chaque employé a été libéré deux jours pour cette tâche.

Résultat

La variance moyenne entre les évaluations par station a été très basse soit 0,12 (8,6 %). Les moyennes des résultats par station furent retenues autant par la gestion que le syndicat comme base de répartition des ressources avec un sentiment d'équité chez les employés. Un autre résultat intéressant était la fierté des employés à présenter leurs résultats à la haute direction.

Analyse :

Le succès de cette démarche résulte dans l’implication des employés d’entretien, soit 20,5 années d’expérience en moyenne, afin d’équilibrer un système complexe en deux jours et trouver un consensus patronat-syndicat. Ce que deux ingénieurs seuls n’avaient pas réussi en un an. L’expérience démontre une compréhension intrinsèque du système entretenu par les employés de maintenance. Une démarche structurée et inclusive a permis d’en sortir tout son potentiel.

4.2.2 Échange sur la fiabilité en exploitation

Contexte

En 1993, la STM a retenu les services d’une équipe d’Ingénierie de maintenance de la RATP (Régie autonome des transports parisiens) afin d’améliorer des performances du métro, au niveau du matériel roulant et des équipements fixes.

Démarche d’implantation :

Les étapes de la démarche proposée étaient :

- Présentation et formation aux ingénieurs maintenance pour le matériel roulant et les équipements fixes d’une durée de trois semaines ;
- Analyse des processus et opportunités d’amélioration ;
- Recommandations finales à la direction générale.

Résultat

À la suite de la présentation et formation, il y a eu une rencontre entre l’équipe technique RATP et l’équipe technique de gestion de maintenance pour les équipements fixes. Bien que l’approche proposée eût déjà donné des résultats fort intéressants hors STM, il a été conclu qu’il y avait des différences importantes entre les installations fixes des deux entreprises conduisant à une stratégie de maintenance très différente, notamment au niveau de la normalisation des équipements et de l’équilibre rebâtir/remplacer. Il a été convenu que les équipements fixes de la STM ne participeraient pas à la suite du projet.

On notera cependant que plusieurs des concepts développés lors des présentations ont, par la suite, été repris et adaptés aux opérations, entre autres dans le projet Opale.

Analyse

Il est souvent plus efficace et prudent, dans un contexte de maintenance industrielle, de procéder à des changements par étapes et de limiter la portée de celles-ci. Ceci permet de tester la nouvelle solution, de l'ajuster à la réalité terrain et permettre aux intervenants d'intégrer le changement.

4.2.3 Système de suivi des interventions sur les équipements d'incendies

Référence : Vadeboncoeur, R. Fokom, F. (2002)

Contexte

En 1999, la STCUM devait inspecter et entretenir environ 20 000 équipements, dont environ 10 000 extincteurs. Ces équipements étaient répartis dans la plupart des bâtiments et véhicules de la STCUM soit 6000 emplacements dans tout le réseau d'exploitation. Ces inspections sont régies par des lois et des règlements. Par exemple, les extincteurs, à titre d'équipements de sécurité, doivent être inspectés annuellement et rechargés aux cinq ans. Il était estimé que le suivi d'environ 10 % de ceux-ci était incertain et qu'il serait difficile de démontrer, en cas d'incident grave, la conformité du suivi d'entretien.

Démarche d'implantation

Le projet fut porté par la section de Prévention incendie (PI) et encadré par le génie industriel (GI). Il comprenait quatre modules soit l'identification par code à barres des équipements et des lieux, la saisie haut volume (lecteur CAB), la saisie bas volume (formulaire) et la base de données (intégration des informations, rapports).

L'équipe de PI a fourni l'expertise du métier et les ressources afin de préciser la problématique et d'implanter la solution. Le GI a accompagné le PI dans la démarche puis a fourni le cadre technique et informatique pour résoudre le problème.

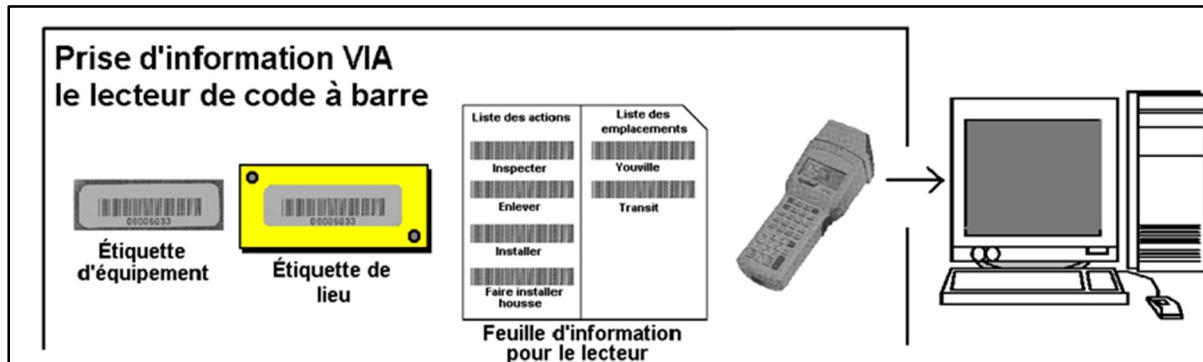


Figure 4.1 Prise d'informations via CAB

Résultat

Le développement et l'implantation de la solution ont été réalisés en un an avec peu de ressources supplémentaires. Le taux d'erreurs de suivis et de retards se situe à moins de 1 %. Autre bénéfice non prévu, lorsqu'un extincteur est retrouvé, on peut rapidement localiser sa provenance et le ramener à son lieu désigné. Cette solution informatique a fonctionné 18 ans avant d'être remplacée. Le projet a fait l'objet de présentations à l'externe par le groupe PI.

Analyse

Il serait facile de croire que l'implantation de technologie a réglé le problème. Cependant, le succès de ce projet dépend principalement d'un changement du mode de fonctionnement à la suite d'une réflexion des membres de l'équipe PI sur leur métier. L'outil informatique est venu soutenir la démarche. Bien qu'à postériori l'idée semble simple, elle a nécessité un changement de mode de fonctionnement et une mobilisation d'équipe pendant 18 mois pour en faire un succès.

4.2.4 Système de saisie de formulaire par reconnaissance de caractères

Contexte

En 2002, le centre d'entretien des équipements fixes (EÉF) de la STM mobilisait cinq commis, à 60 % de leurs temps, pour la saisie informatique du retour technique des interventions de maintenance rapportées manuellement sur des formulaires. En plus d'être harassant, ce travail

causait des retards de suivi et la perte des commentaires inscrits sur l'ordre de travail. De plus, la description de 96 % des interventions était : « fait ». L'environnement de travail et les coûts d'utilisation ne permettaient pas d'utiliser une solution numérique (PC mobile). Étant donné qu'un projet de remplacement de la GMAO de la direction EEF commençait, la reconnaissance numérisée de formulaire devenait une option intéressante de transmission des informations.

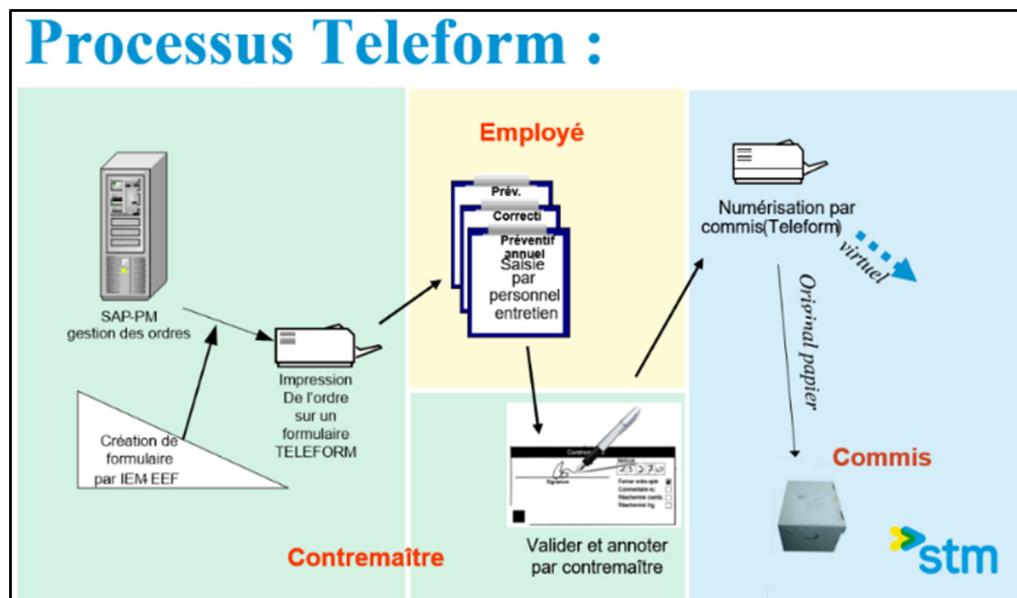


Figure 4.2 Processus Teleform

Démarche d'implantation

La première partie du développement (achat de la technologie de l'entreprise Teleform, développement, tests, débogage, formulaires) fut confié à l'Ingénierie de maintenance pendant les deux premières années.

Par la suite, l'implantation graduelle au travers des différentes divisions et sections d'opération a nécessité un autre 4 ans pour être pleinement opérationnelle. Le déploiement de la solution a tenu compte de l'optimisation de l'impact sur les 32 systèmes techniques, pour 12 corps de métier et 500 employés. L'implantation s'est déroulée sous forme d'un à trois sprints simultanés de quatre à six semaines par des groupes de travail opération-logistique-ingénierie.

Résultat

À la fin de l'implantation, la saisie du retour technique n'occupait qu'un commis à 80 % de son temps. De plus, le retour technique précisait l'équipement et l'intervention réalisée. Il permettait aussi de créer automatiquement un nouveau bon de travail et la feuille de retour technique était consultable électroniquement par tous.

En 2008, lors du lancement du renouvellement de la GMAO, cette technologie a été retenue comme principal outil de communication des opérations. Ils traitaient 130 000 formulaires/année par un commis à 60 % de son temps. En 2014, la STM a présenté, avec un grand succès, ce système au cinquième colloque de la maintenance industrielle de Montréal, à l'American Public Transport Association et au PMI Montréal (Project Management Institute).

Analyse

En cette ère des communications mobiles, mobiliser des ressources pour planter l'utilisation d'outil papier semble anachronique. Les équipes TI ont d'ailleurs boudé cette solution pendant plus de 8 ans, avant d'en reprendre le contrôle pour le déployer à d'autres utilisations. L'intérêt était d'abord opérationnel, les conditions d'utilisation (isolement radio, saleté, champ électrique . . .) se prêtaient peu à l'utilisation de PC mobile. De plus, il aurait fallu fournir et entretenir environ 350 PC mobiles industriels dont l'espérance de vie est de 18 mois, soit environ un million de dollars annuellement. Mais surtout, l'accent aurait porté sur l'ajout d'un nouvel outil informatique et non sur la qualité de la transmission d'une information pertinente (formulaires) et son utilisation.

Les implantations progressives et adaptées par secteurs et/ou métiers, en mode sprint, ont permis de prioriser en fonction des besoins de ceux-ci et de la disponibilité des intervenants. On notera que plus de 70 % des ressources du projet ont été mis sur la création ou la mise à jour du contenu de maintenance, via les formulaires, en fonction des domaines d'entretien. Une partie importante du projet fut la gestion des connaissances de maintenance, soit faire passer une compréhension empirique partagée de la maintenance en compétence utile et transférable (réf. Chapitre 5.4).

4.2.5 Opale PC

Contexte

On peut retrouver au sous-chapitre 3.3 le contexte et la portée du projet. Rappelons simplement que l'objectif était d'intégrer une quarantaine de bases de données ou tableurs nécessaires aux opérations afin de les sécuriser et d'en assurer la pérennité. L'idée était que si chacune des bases n'avait pas nécessairement assez d'envergure pour assurer un encadrement professionnel à long terme, leur regroupement le justifiait.

Démarche d'implantation

Dans un premier temps, l'équipe TO a développé la structure de base incluant l'accueil, la structure, la taxinomie et la sécurité. Puis chaque module/fonction a été développé, en premier, en fonction des besoins du projet Opale puis en intégrant les besoins opérationnels. Le développement se faisait sous forme d'un ou plusieurs sprints de 4 à 12 semaines impliquant l'équipe TO, un ou des porteurs des opérations et un responsable technique.

Résultat

On retrouve au sous-chapitre 3.3.4 la description des résultats.

Analyse

Le projet Opale PC vise la mise en service d'outils d'optimisation de la maintenance dans un environnement diversifié. Le type de gestion utilisé pour le projet Opale PC a beaucoup de points en commun avec celui de l'implantation la maintenance 4.0. Il a déjà prouvé son efficacité et sa pertinence.

- Privilégier un intégrateur commun et des modules indépendants. Par exemple, le suivi de pompes a des caractéristiques très différentes que le suivi des filtres à air (capteurs, modes de dégradation, interventions). La méthode d'analyse prévisionnelle peut être très différente et doit être traitée au cas par cas (modules indépendants). Cependant, il est nécessaire d'intégrer les résultats pour avoir une vision globale (intégrateur) ;
- Les intervenants peuvent changer d'un type d'équipement à l'autre ;
- La démarche est cependant cohérente entre les groupes d'équipements.

Tout comme l'implantation de la maintenance 4.0, le projet Opale PC a été un projet d'amélioration continue de la performance des équipements. Au début, il y avait une intuition de la démarche à faire, mais chaque livrable révélait d'autres pistes d'amélioration possible. Ceci générait des questionnements, des changements de paradigme et de nouvelles fonctions.

Un projet très structuré avec des livrables stables n'a pas intérêt à être conduit en mode Agile et profitera de l'organisation et de la structure des méthodes en cascade. Cette méthode offre un cadre clair où la portée complète du projet est convenue à l'avance entre l'équipe de développement et ses clients. Chaque phase du processus est documentée en détail et nécessite souvent moins d'interventions des clients.

Cependant, dans un projet d'amélioration sur un processus opérationnel, l'évolution est beaucoup moins prévisible. Le choix de l'approche Agile est souvent plus adapté, car elle permet de planifier la prochaine étape en tirant profit des impacts et résultats des étapes passées.

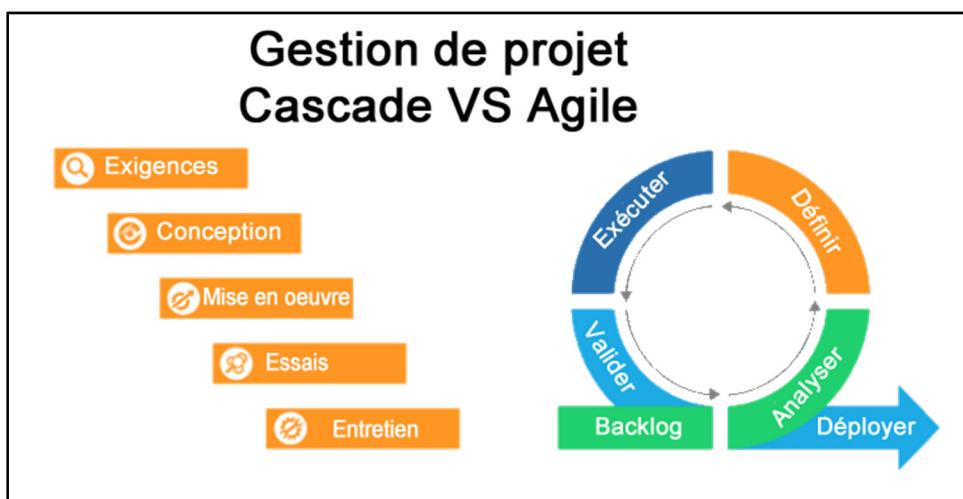


Figure 4.3 Gestion de projet: Cascade VS Agile
 Traduit de <https://www.trustradius.com/difference-between-agile-vs-waterfall>

4.2.6 Observations

Ces projets d'implantation ont permis de dégager certaines observations.

- Le personnel de maintenance a, généralement, une bonne compréhension intrinsèque du système entretenu, de leurs métiers et de leurs équipements ;
- Il n'existe pas deux environnements de maintenance identiques ;
- L'introduction d'une nouvelle technologie en maintenance est facilitée par trois points ; elle répond à un problème, elle permet d'impliquer le personnel intéressé et elle est graduelle ;
- Une démarche Agile s'applique bien à une optimisation des processus ;
- La sélection, l'engagement et la participation du personnel sont très importants pour le succès d'un projet d'implantation.

4.3 Sondage sur la perception de la démarche

Dans le cadre de cette maîtrise, des entrevues ont été réalisées auprès du personnel de maintenance afin de connaitre leurs perceptions sur l'approche progressive telle que proposée dans ce document.

4.3.1 Caractéristique de l'échantillon

Treize personnes ont participé au sondage. Chacun avait plus de 15 ans d'expériences dans le domaine, n'avait déjà utilisé la maintenance 4.0 et provenait de quatre types d'entreprises différents (transport, chimique, production, service externe de maintenance).

Postes¹ : Un directeur

 Trois surintendants/chefs de division

 Trois ingénieurs/techniciens

¹ Le genre masculin est utilisé dans le présent texte comme genre neutre. L'emploi du genre masculin a pour but d'alléger le texte et d'en faciliter la lecture.

- Trois contremaîtres/chefs d'équipe
- Trois employés de maintenance industrielle

4.3.2 Qualification de l'échantillonnage

La première étape était de vérifier si la figure 2.5 (Regroupement des types de défis des solutions 4.0, Bédard-Maltais (2017)) correspondait à leur réalité. Le cas échéant, on pourrait considérer que, malgré sa taille réduite, l'échantillon serait représentatif des intervenants en maintenance.

Le libellé des défis du sondage Bédard-Maltais a été utilisé, mais le défi « Manque d'employés qualifiés » a été divisé en deux soit « Manque d'employés qualifiés (IoT/analyse) » axé sur la compétence et « Manque de temps /surcharge » axé sur la disponibilité du personnel. Les résultats ont, par la suite, été mis à l'échelle par un facteur de 0,62 afin de pouvoir comparer les résultats.

Quels sont les plus grands défis liés à la mise en oeuvre de solutions 4.0 ?	Bédard-Maltais (2017)	Sondage (2021)	Sondage mise à l'échelle	Diff.
	n=370	n=13	Facteur : 0.62	
Manque d'employés qualifiés (IoT/analyse)	42%	59%	37%	-5%
Retour sur investissement incertain	31%	55%	34%	3%
Manque de temps /surcharge		52%	32%	--
Coûts excessifs	38%	49%	30%	-8%
Cybersécurité	10%	38%	24%	14%
Difficulté à savoir par où commencer	13%	32%	20%	7%
Analyse pertinente des données	12%	31%	19%	7%
Complexité des technologies	21%	28%	17%	-4%
Financement	24%	27%	17%	-7%
Résistance des employés au changement	31%	23%	14%	-17%
Intégration de données	9%	15%	10%	1%
Moyenne	23.1%	37.2%	23.1%	
Ressources humaines				
Risques financiers				
Technologie				

Figure 4.4 Comparaison Bédard-Maltais (2017) vs Sondage

Lorsque l'on compare les résultats, on remarque qu'ils sont relativement semblables à deux exceptions près : la cybersécurité qui a augmenté de 14 % et la résistance au changement qui a baissé de 17 %. Ces deux points s'expliquent par l'année de réalisation du sondage. En effet, la présence grandissante au fil des ans d'outils informatiques dans les tâches professionnelles et dans la vie courante favorise l'acceptation de nouvelles applications informatiques.

Compte tenu des résultats, on peut donc considérer que, malgré sa taille réduite, l'échantillon serait représentatif des intervenants en maintenance.

4.3.3 Objectif du sondage

Le sondage a porté sur l'évaluation de la contribution de la démarche proposée aux par rapport aux quatre premiers défis identifiés dans le sondage Bébard-Maltais ainsi que sur l'intérêt général de ce type de démarche et l'évaluation de la probabilité de succès.

4.3.4 Perception des intervenants sur la démarche

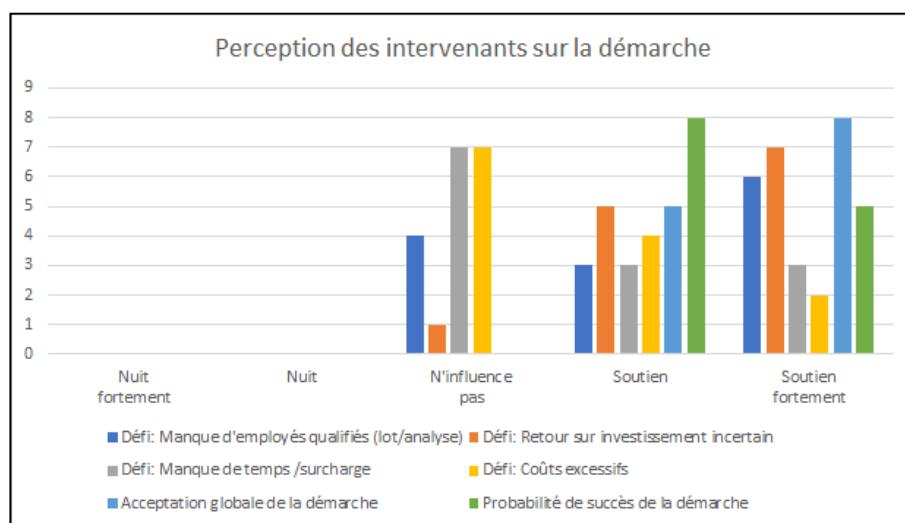


Figure 4.5 Perceptions des intervenants sur la démarche proposée

Les participants ont majoritairement répondu que soutenir ou soutenir fortement la démarche par rapport aux quatre défis identifiés de l'implantation de la maintenance 4.0. Mentionnons

toutefois deux exceptions, soit que l'implantation cette nouvelle technologie n'allait pas baisser, à court terme, la surcharge et que le risque de coûts excessifs n'était que réparti dans le temps.

La perception des intervenants est que la démarche proposée soutenait ou soutenait fortement l'acceptation globale de la maintenance 4.0 et sa probabilité de succès.

4.3.5 Commentaires des intervenants

Suite à l'évaluation, les intervenants ont été invités à faire des commentaires :

Manque d'employés qualifiés (Iot/analyse) :

La première implantation nécessitera plus d'encadrement.

Ça dépend beaucoup du support.

Retour sur investissement incertain :

La répartition des investissements dans le temps baisse de beaucoup le risque.

L'aspect « capteur comme service » minimise les investissements.

L'aspect Iot facilite l'installation et en minimise les coûts (pas de filage, pas réseau TI)

Si le système ne répond pas aux besoins, on ne reste pas pris avec

Manque de temps /surcharge :

Le sans-fil minimise les temps d'installation

N'alourdis pas les services informatiques

Coûts excessifs :

La répartition dans le temps me permet de répartir/arrêter les coûts.

Intérêt de ce type de démarche :

Le risque de la décision d'implanter peut se prendre à un bas niveau (contremaître ou surintendant).

La répartition dans le temps minimise le risque que le projet prenne trop d'ampleur ou de ressource.

Il y a moins de risque de se faire dépasser/submerger par la technologie.

Ça permet de tester et de voir l'impact à petite échelle.

4.3.6 Commentaires sur le rapport prévisionnel

Le rapport prévisionnel a été présenté aux intervenants pour commentaires. Il a été généralement bien accueilli quoique nécessitant explications et mise en contexte. Le commentaire le plus fréquent est qu'il y avait beaucoup d'information qui n'était pas disponible ailleurs sans analyse approfondie et pourrait être utile pour améliorer la maintenance.

4.4 Positionnement de la démarche proposée

Tout comme on ne s'attend pas qu'une voiture d'entrée de gamme ait les mêmes performances qu'une voiture de luxe, la démarche proposée n'est pas conçue pour remplacer les grands systèmes de maintenance 4.0. Elle peut cependant s'avérer un outil fort utile pour des besoins limités ou comme transition vers des systèmes intégrés.

La démarche a été conçue afin de permettre aux intervenants de maintenance de progresser à leurs rythmes en minimisant les impacts financiers et le risque. Les expériences d'implantation (4.2) et les échanges avec les intervenants (4.3) permettent de penser qu'une implantation progressive autorisant les erreurs et adaptations répondra mieux à l'environnement qu'une démarche plus rigide.

Advenant que la démarche proposée ne soit pas suffisante pour les besoins de l'entreprise, l'expérience vécue et une meilleure compréhension des caractéristiques des équipements permettra de mieux concevoir un plus gros système. De plus, la conversion des données pourrait permettre de les réutiliser dans le futur système.

4.4.1 Avantages et limites de l'approche proposé

Le système proposé présente, entre autres, ces avantages ;

- Déploiement rapide ne nécessitant pas d'infrastructure ;
- Peu de risques incluant les risques financiers ;
- Permet d'évaluer la signature de chaque équipement et de tester sa prévisibilité ;
- S'adapte bien à l'approche d'échec accéléré du lancement minimal (Ries, E. 2011) ;
- Information recueillie transférable ;
- Suivi des capteurs sur Web ;
- Alerte de dépassement de limites ;
- Analyse graphique des tendances ;
- Rapport prévisionnel adaptable.

Le système proposé présente, entre autres, ces limites ;

- Usuellement monoposte ;
- Peu de possibilité d'intégration avec les logiciels d'entreprises tels le logiciel de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) ou le logiciel de planification des ressources ;
- Ressources de calcul limitées ;
- Nombre limité d'équipements suivis ;
- Le transfert des lectures en mode semi-automatique ;
- Performance limitée des capteurs.

Ces avantages et limitations permettent d'identifier quatre opportunités d'utilisation du système, soit : les PME, les services externalisés et les projets pilotes de maintenance 4.0. De plus, les capteurs IIoT peuvent soutenir les démarches de résolution de problèmes

4.4.2 Situations où le système proposé serait bien adapté

Petites et moyennes entreprises

Selon l’Institut de la statistique du Québec (2020), les emplacements d’entreprise qui compte 19 employés et moins représentent 85 % des entreprises au Québec.

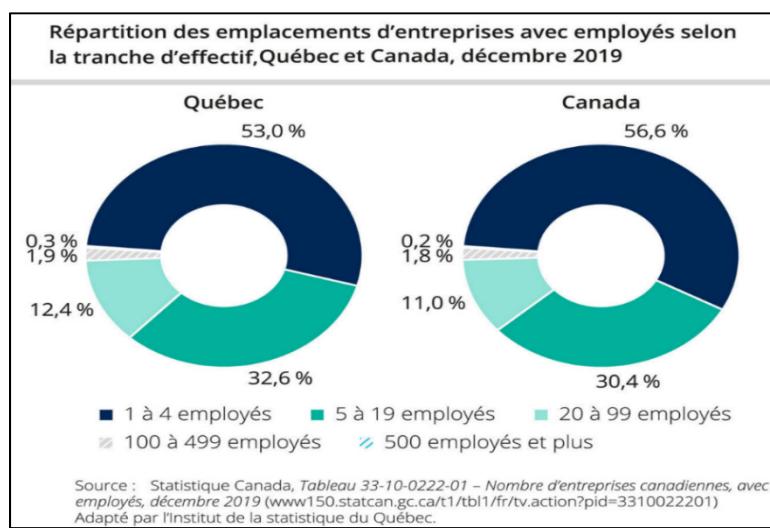


Figure 4.6 Répartition des emplacements d’entreprises selon la tranche d’effectif.

Tiré de l’Institut de la statistique du Québec (Mai 2020)

Pour la plupart d’entre elles, le risque, les investissements et l’énergie nécessaire pour démarrer en 4.0 « classique » sont souvent inabordables. Une solution 4.0 d’entrée de gamme leur permettra de profiter de ses avantages telle l’optimisation des coûts de maintenance, de la fiabilité des équipements et de la réduction des temps d’arrêt.

Services de maintenance externalisés

Souvent, l’entreprise n’a pas les ressources nécessaires ni l’intérêt pour assurer certaines parties de la maintenance. Le recours à l’externalisation est alors une option intéressante. Un des mandats du prestataire de maintenance externalisée est alors de fiabiliser le parc de machine des entreprises.

L'utilisation d'une solution de maintenance 4.0 peut s'avérer très utile pour les services de maintenance externalisés. Elle permet d'offrir des services améliorés aux entreprises par une surveillance en temps quasi réel de l'état des équipements et d'optimiser l'utilisation de ses ressources.

Une des contraintes à l'utilisation d'un modèle de maintenance prévisionnelle relativement fiable est le besoin de fournir un nombre élevé d'événements (panne) pour alimenter les statistiques. Si on suit 2 équipements qui tombent en panne deux fois par année, il faudra cinq ans avant d'avoir une vingtaine de pannes, ce qui est souvent un minimum pour avoir une prévision limitée. Si le service de maintenance externalisé se spécialise dans une gamme limitée d'équipement, il lui est possible d'avoir un suivi de beaucoup plus d'équipements du même type et d'en développer les modèles prévisionnels plus robustes adaptés aux conditions particulières de chaque entreprise. Ce qui n'est pas évident pour une entreprise qui n'a que quelques équipements d'un même type. Le système proposé s'adapte bien à ce type de service sans avoir à interférer avec le réseau de l'entreprise cliente.

Projet pilote de maintenance 4.0

On ne connaît que les choses que l'on apprivoise, dit le renard.

Antoine de Saint-Exupéry

La figure 2.5 présente les types de défis de la maintenance 4.0. La décision d'implanter la maintenance 4.0 implique des défis technologiques, financiers et en ressources humaines. De plus, son implantation diffère d'une entreprise à l'autre.

Une approche pour baisser les risques est de créer un projet pilote de maintenance 4.0 basé sur un système d'entrée de gamme. Celui-ci pourrait permettre de répondre sinon de dimensionner les divers défis et d'initier des acteurs clés internes à cette technologie. Il permettrait, de plus, d'évaluer les signatures des équipements et d'orienter le choix futur des capteurs.

Finalement, la disponibilité des lectures IIoT pourrait permettre d'améliorer les capacités d'analyse de l'équipe de maintenance (voir figure 2.7 Modèle de maturité des capacités d'analyse). De plus, cette approche permet l'adaptation des facteurs humains tels que la culture, l'organisation et le leadership qui sont essentiels au succès du projet.

Soutien à la démarche de résolution de problèmes

Without data, you're just another person with an opinion.

William Edwards Deming

Lors d'une démarche de résolution de problèmes, plusieurs méthodes sont disponibles pour l'encadrement. Prenons, comme exemple, le diagramme d'Ishikawa. On divise la situation en cinq thèmes et on inscrit les causes possibles. Puis, on vérifie et élimine les causes non pertinentes et on garde les causes les plus probables. Bien que cette méthode soit très efficace, la qualification des causes est souvent une opinion groupale, influencée par un des intervenants ou par des paradigmes, sans être nécessairement fondée. Il en résulte un risque d'erreurs, des pertes de temps et des coûts inutiles.

L'utilisation de capteurs IIoT, soutenue par des outils d'analyse, permet de tester rapidement les causes identifiées et augmente ainsi la pertinence des analyses et par conséquent l'efficacité du processus.

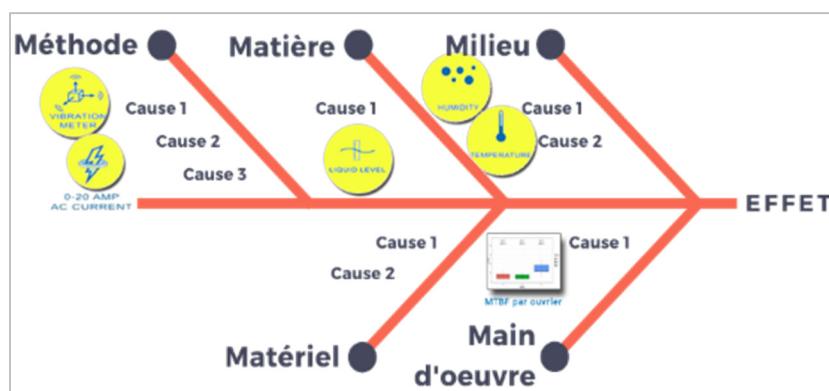


Figure 4.7 Exemple de support au diagramme Ishikawa

Lors d'une telle démarche, il peut être intéressant de disposer d'un coffret d'intervention IIoT. On retrouve y retrouve différents capteurs adaptés aux opérations et une passerelle reliée au serveur de télémétrie. On peut, dès les premiers indices, commencer à caractériser la situation et baser la discussion sur des données et leur interprétation.

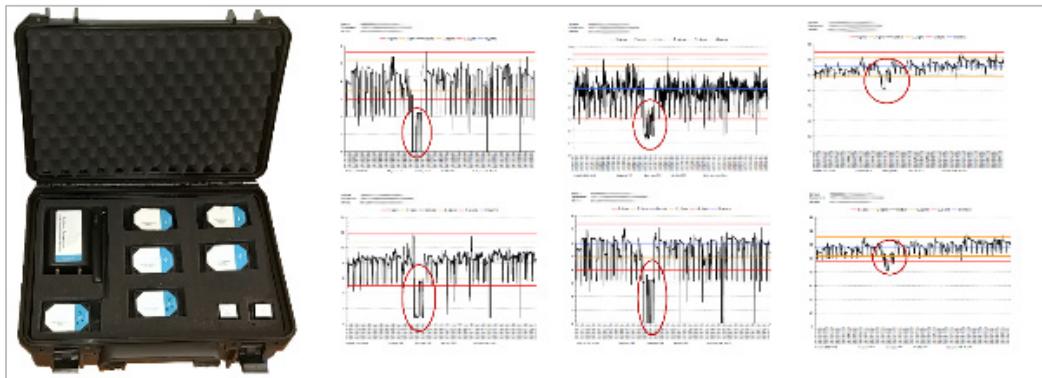


Figure 4.8 Coffret d'intervention et de caractérisation d'événements

4.5 Conclusion

On optimise les chances d'implantation d'une approche maintenance 4.0 en respectant ces points :

- Impliquer le personnel de maintenance dans la démarche ;
- Laisser au personnel la possibilité d'intégrer la nouvelle approche via des petits projets répartis dans le temps ;
- Recourir à de petits projets répartis dans le temps permettant de s'adapter à l'environnement et de minimiser les risques ;
- Utiliser la méthode de type Agile qui est particulièrement bien adaptée à cette démarche.

Les entrevues auprès d'intervenants en maintenance industrielle en confirment la perception d'impact positif les principaux défis soulevés ainsi que l'intérêt de la démarche et du rapport prévisionnel.

CHAPITRE 5

PROPOSITION D'UNE DÉMARCHE D'ENTRÉE DE GAMME

In God we trust, all others must bring data

William Edwards Deming

5.1 Introduction

Le chapitre un présente la maintenance industrielle et ses enjeux. Le chapitre deux porte sur maintenance 4.0, son intérêt et les inhibiteurs à l'implantation observés. Le chapitre trois présente l'importance du facteur humain et propose un outil permettant de valider l'acceptabilité d'une démarche d'implantation technologique. Cet outil permettrait d'optimiser la probabilité de succès d'une démarche de maintenance 4.0. Finalement, le chapitre quatre décrit les points qui optimiseraient les chances d'implantation d'une approche de maintenance 4.0.

Le chapitre cinq propose une démarche d'entrée de gamme, **FMDS^{4.0}** (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Sécurité 4.0), qui a été conçue afin de permettre aux équipes de maintenance de débuter et progresser en maintenance 4.0. Elle facilite son l'introduction en adressant ses principaux inhibiteurs et en tenant compte des facteurs humains des équipes de maintenance.

5.2 Système versus application

Deux termes seront fréquemment utilisés dans ce chapitre, soit système et application. Selon, l'Office québécois de la langue française, un système est un ensemble d'objets, de processus ou de concepts en relation mutuelle produisant ou conçu pour produire un résultat particulier. Le système proposé inclut la démarche, le processus, les divers composants, les

logiciels et l'application. L'application **FMDS**^{4.0} désigne l'ensemble de programmes dont se servent les utilisateurs dans le cadre de la démarche.

5.3 Constraintes et critères de conception

Au chapitre 2.4, on retrouve les principaux défis à l'implantation, ils seront utilisés comme contrainte à la conception. On les retrouve classés par type au tableau 5.1.

Tableau 5.1 Constraintes de conception

Type	Constraintes de conception
Finance	A. Retour sur investissement incertain
Finance	B. Coûts excessifs
Finance	C. Financement
Ressources humaines	D. Difficulté à savoir par où commencer
Ressources humaines	E. Manque d'employés qualifiés
Ressources humaines	F. Résistance des employés au changement
Ressources humaines	G. Maturité des capacités d'analyses
Ressources humaines	H. Signification/pertinence analyses données
Technique	I. Cybersécurité
Technique	J. Complexité des technologies
Technique	K. Intégration de données (Ti/To)
Technique	L. Portabilité, interopérabilité des données

Cette liste a été utilisée comme base pour créer les critères de conceptions. Chaque contrainte devant être adressée par, au moins, un des critères de conceptions

Tableau 5.2 Critères de conception

Critère de conception	Contrainte(s) adressée(s)
CC 1. Analyse adaptable aux besoins	H, G
CC 2. Démarche itérative, approche Agile	D, E, F, J
CC 3. Données infonuagiques anonymisées	I
CC 4. Données sensibles restent à l'interne	I
CC 5. Données SQL/XLS accessibles	J, K, L
CC 6. Installation/utilisation des capteurs simple	E, F, J
CC 7. Investissements progressifs	A, B, C
CC 8. Logiciel pour intégrateur	B, J, K, E, F, L
CC 9. Petits projets -> Essais, erreurs, ajustement, succès	D, E, F, H
CC 10. Petits projets -> Go/no go + gain à chaque étape	A, B, C
CC 11. Projets pilotes avec volontaire	D, E, F
CC 12. Simplification et accompagnement vers Autonomie	D, E, G
CC 13. Système de captation sécurisé	I
CC 14. Utilisation limitée à MS Office pour environnement local	J, K, I
CC 15. Vaste choix de capteur à prix raisonnable	A, B, C, H
CC 15. Peu ou pas de développement de capteur/passerelle	A, B, C, E, J

5.4 Structure de la démarche proposée

La démarche proposée se divise en trois parties :

- L'encadrement ;
- La démarche ;
- La fonction captation ;
- La fonction intégration.

5.4.1 L'encadrement

Il est recommandé, lors des premières implantations, d'avoir recourt à un facilitateur maîtrisant la démarche pour encadrer la démarche. Cependant, on vise l'autonomie du personnel de

maintenance pour la démarche. Le facilitateur deviendra progressivement un conseiller ad hoc au besoin pour l'équipe.

5.4.2 **Démarche**

Bien que les aspects technologiques soient souvent mis de l'avant en maintenance 4.0, l'adaptation à la réalité opérationnelle et la gestion des impacts du point de vue des intervenants, particulièrement sur les paradigmes de maintenance, peuvent faire la grande différence entre le succès ou l'échec de ce type de démarche.

Selon Butler (2016), il est préférable de passer par une période de conception de projet pilote de type Agile avec itérations avant de passer à une démarche d'implantation commerciale de type Cascade si nécessaire. La méthode Agile basée sur une implantation plus légère et itérative impliquant du personnel permettra à l'équipe de maintenance d'évoluer et d'ajuster sa démarche pour bien répondre aux particularités de l'entreprise. Elle pourra tenir compte de la maturité de maintenance, des particularités de production, de la culture et des dynamiques d'équipe. De plus, elle permettra de débuter progressivement et de garder une possibilité de retrait ou de pause à l'implantation, ce qui implique moins de risque pour l'entreprise.

La démarche d'implantation propose d'utiliser une adaptation de la méthode Agile. Elle se divise en sprint et cible un point (équipements/systèmes) opérationnel irritant. Un des objectifs est de permettre à l'équipe de maintenance de s'habituer aux nouveaux outils et d'intégrer cette technologie aux méthodes de l'entreprise afin d'optimiser les résultats. Il n'existe pas deux réalités terrain de maintenance identiques, l'objectif étant d'adapter la démarche et les outils au milieu.

Selon Ozanne & Pasquier (2011), la démarche devrait tenir compte de certaines constatations :

- Les meilleures idées ne viennent pas forcément au début du projet ;
- Les besoins peuvent évoluer pendant le projet ;

- Il est plus facile de construire par étape que tout imaginer dès le début ;
- Le chiffrage et le « reste à faire » sont difficiles à évaluer.

Approche

Selon Koi-Akrofi et coll. (2019), l'approche Agile :

- Permet d'effectuer des changements après la phase de planification initiale ;
- Suis l'évolution des besoins des clients et permets de répondre à leurs attentes ;
- Permet de rattraper les erreurs grâce aux tests ;
- Motive davantage les gens à coopérer que les méthodologies traditionnelles.

L'approche préconisée est :

- Implanter Agile de façon soutenue grâce à un influenceur interne ;
- Organiser le travail en mode itératif et réactif ;
- Focaliser sur la fonctionnalité et la satisfaction client/utilisateur ;
- Construire en adéquation avec les capacités et limites humaines ;
- Procéder par petits projets en mode essais, erreurs, ajustements, succès ;

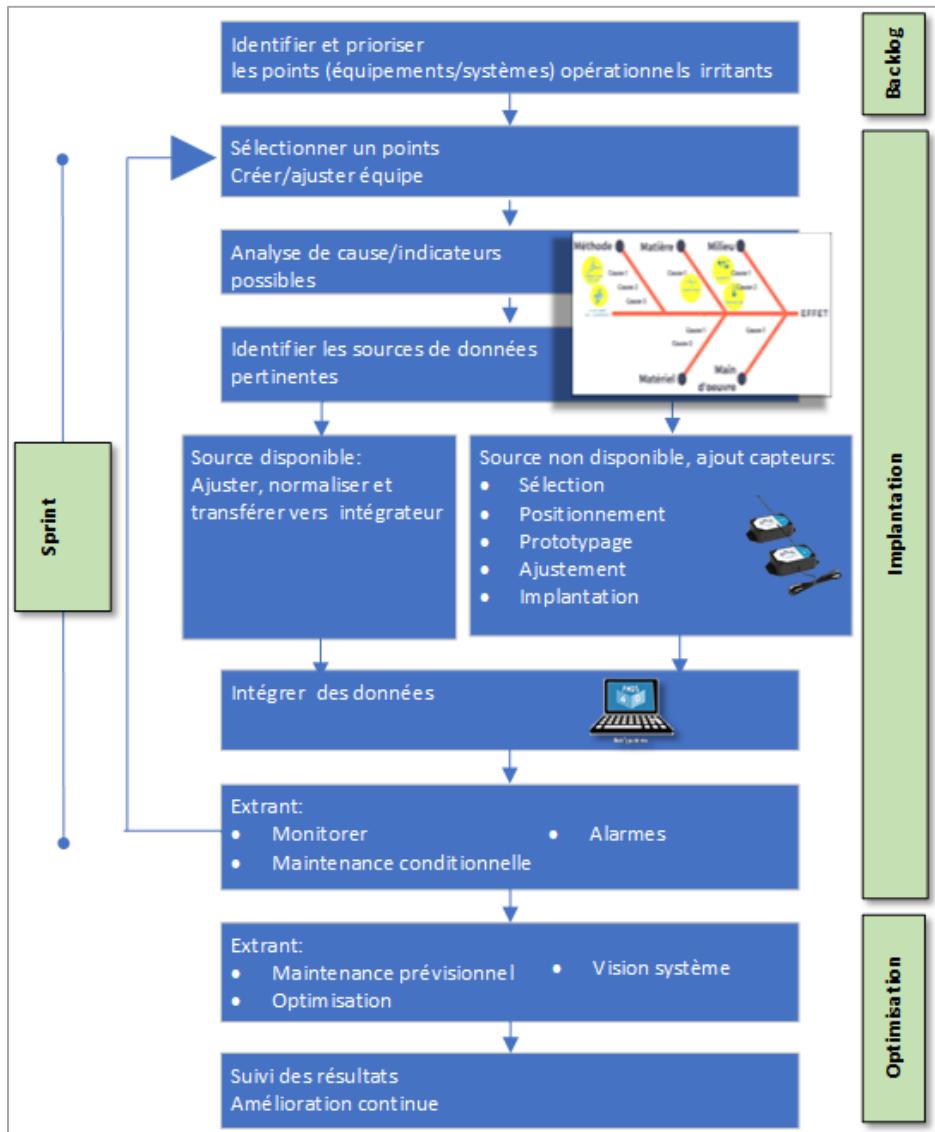


Figure 5.1 Processus d'implantation

Dans les défis identifiés à la figure 2.5, on en ressort trois types, les ressources humaines (compétence et disponibilité), les risques financiers et la technologie. Rappelons que la fonction maintenance est un service de soutien aux opérations et non un centre de profit direct.

L'approche proposée utilise le concept de produit minimum viable² et minimise les défis. Elle permet de débuter avec un petit groupe d'équipement et un minimum de ressources humaines et financières impliquées. À chaque étape, on obtient des livrables opérationnels. Le rythme de la démarche s'adapte à chaque entreprise. On peut se rendre compte directement de l'intérêt, des impacts et des opportunités de la démarche au fur et à mesure. On apprend et on s'ajuste. En tout temps, on peut faire une pause sans perdre les acquis et poursuivre plus tard.

Il est recommandé, lors des premières implantations, d'avoir recourt à un facilitateur maîtrisant la démarche pour encadrer celle-ci. Cependant un des objectifs est l'autonomie du personnel de maintenance pour la démarche. Le facilitateur deviendra progressivement un conseiller ad hoc au besoin pour l'équipe.

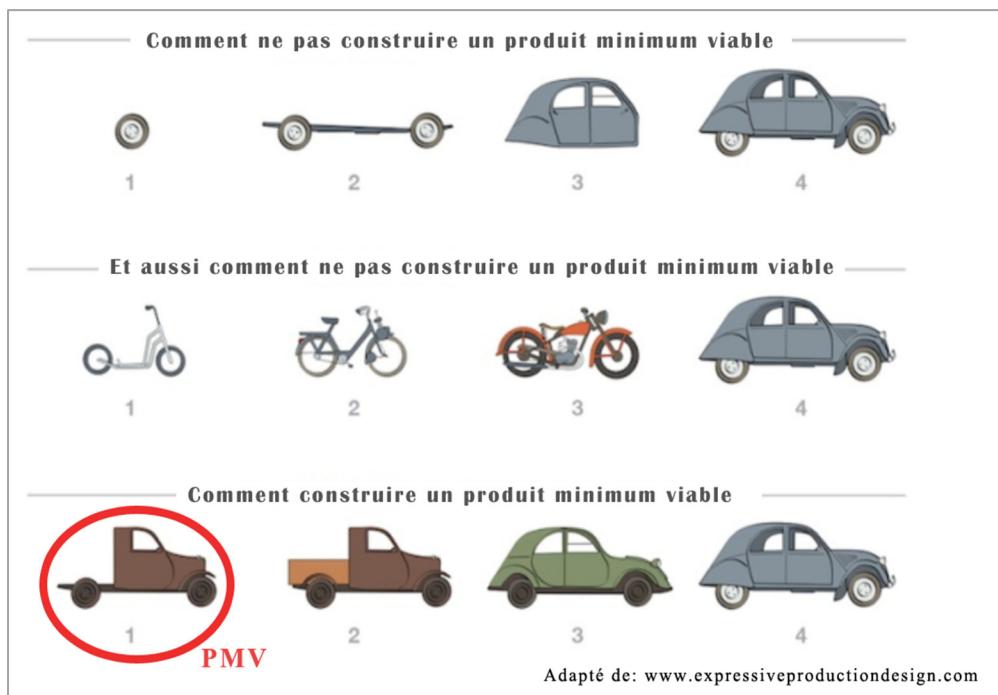


Figure 5.2 Concept de produit minimum viable : Livraison à chaque étape orientée vers le résultat final Traduit de www.expressiveproductiondesign.com

² Réf : <https://www.usabilis.com/mvp-minimum-viable-produ>

Test de la démarche avec le modèle TAM2

Le chapitre trois présente et valide un modèle pour prédire l'acceptabilité d'une nouvelle technologie. Nous l'utiliserons ce modèle pour valider la démarche proposée en 3.2

Tableau 5.3 Évaluation de la démarche proposée avec le modèle TAM2

Concept	Stratégies d'implantation	Impact
Norme subjective	Implication directe d'un influenceur. Cette condition était nécessaire pour la réalisation d'une implantation.	++
Image	Support des contremaîtres et surintendants nécessaires. Il est recommandé que des employés de la section cible présentent les résultats aux autorités.	++
Pertinence professionnelle	Sélection de l'ordre des implantations en fonction de l'amélioration des irritants opérationnels. Les demandes devraient être portées par la gestion.	++
Qualité de la production	L'influenceur teste et consulte ses collègues pour que les nouvelles fonctions répondent aux besoins opérationnels.	++
Démontrabilité des résultats	Suivi statistique et partage des résultats.	++
Expérience avec le système	L'implantation se fait par étapes en fonction des types d'équipement. Le traitement des résultats est semblable entre ceux-ci.	+
Volontariat perçu	La sélection de l'influenceur et de la section cible devrait être sur une base volontaire et intéressée.	++
Utilité perçue	Étant donné que la priorisation des modules visait les équipements qui causent le plus d'irritants opérationnels, normalement chaque implantation devrait avoir un impact opérationnel.	++
Facilité d'utilisation perçue	Un effort de soutien sera fourni lors de la première utilisation du système par un employé. Par la suite, étant donné que la même logique est utilisée, chaque nouvelle implantation ne nécessiterait qu'une brève présentation par le contremaître.	++
Intention d'utiliser	Prévision compte tenu des résultats	++
Comportement d'utilisation	Prévision compte tenu des résultats	++

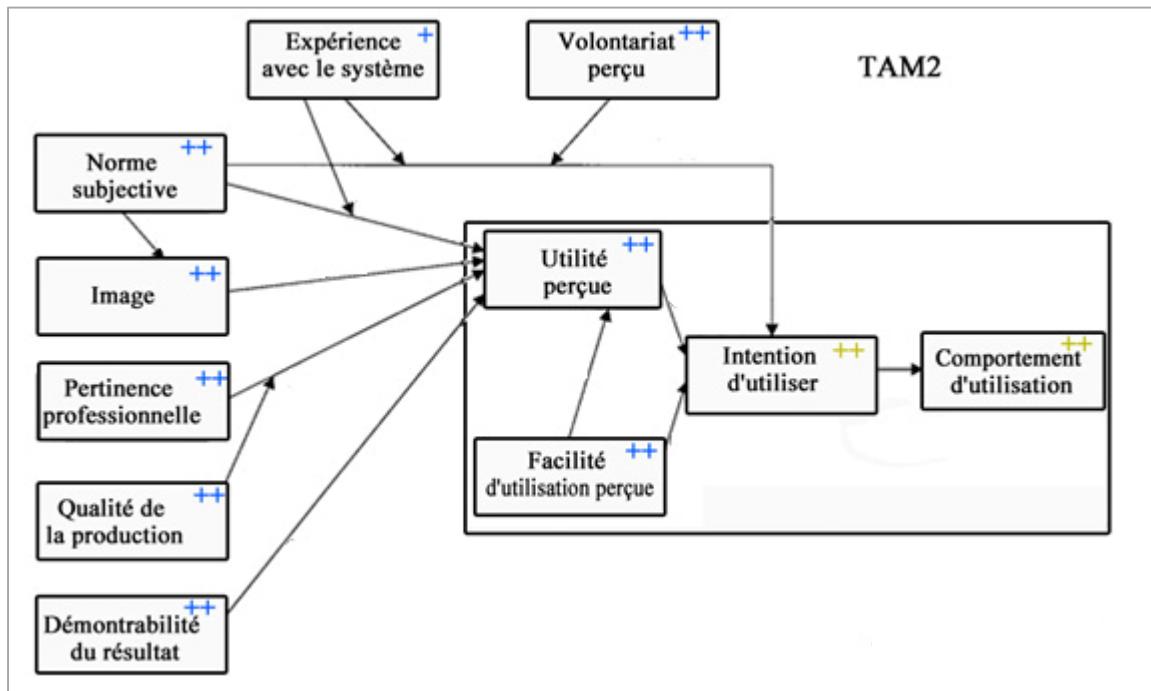


Figure 5.3 Résultat de TAM2 appliquée à la démarche proposée

L'évaluation une démarche avec le modèle TAM2 nécessite une estimation des impacts des stratégies d'implantation pour chacun des concepts. Il permet d'identifier les concepts qui pourraient nuire à l'implantation et de chercher de correctifs afin d'optimiser la démarche.

Le résultat du modèle TAM2 sur la démarche proposée indique qu'elle devrait avoir une bonne acceptation auprès des utilisateurs.

5.4.3 Fonction captation

La fonction captation inclut l'infrastructure, les équipements et le logiciel qui permettent de mesurer un phénomène physique et de le restituer sous forme de données à l'intégrateur.

Voici les critères de sélection et leurs caractéristiques minimales qui ont guidé le choix pour le système de captation sont :

- Capteurs simples à sélectionner, installer et utiliser ;
- Choix de type de captation en lien avec les phénomènes physiques ;
- Capteurs étalonnés et qui peuvent être recalibrés ;
- Performance de gamme moyenne ;

Intervalle de temps entre les lectures ≥ 10 min

Précision de lecture $< 2\%$

Capteurs sans fils portés > 100 m

Autonomie des capteurs > 6 mois ;

- Coût modéré (capteur < 500 \$, passerelle < 800 \$) ;
- Données sécurisées et anonymisées ;
- Signalement, en temps quasi réel, des dépassements de limites.

Cette présente étude ne vise pas le développement et l'exploitation d'un service de capteurs.

Selon Alarbi & Lutfiyya (2018), offrir un service SaaS (Sensor as a service) ne nécessite que ses développeurs d'applications et ingénieurs s'occupent de :

- (i) La sélection/développement des capteurs ;
- (ii) La gestion et le stockage des données des capteurs ;
- (iii) La garantie d'une capacité de stockage et de traitement suffisante pour prendre en charge à la fois l'analyse des tendances et le traitement en temps réel ;
- (iv) La gestion des coûts de services.

Pour le système proposé, un modèle de service basé sur l'infonuagique SaaS a été retenu. Dans ce modèle, les capteurs sont connectés à un intergiciel (« middleware »), hébergé sur une

plateforme infonuagique. Les consommateurs de données ont accès aux lectures des capteurs sur Internet en payant des frais de service aux propriétaires de l'intericiel. L'architecture retenue se concentre spécifiquement sur la détection en tant que service. Les fonctionnalités nécessaires sont la fourniture et la gestion des capteurs ainsi que la gestion et la transmission des données incluant l'aspect sécurisation des données. La compréhension des utilisateurs sur les fonctionnalités est de haut niveau avec peu d'informations sur la façon de fournir la fonctionnalité.

Le choix retenu pour la fonction de captation est son externalisation par une technologie SaaS offerte par la firme Monnit³ fondée en 2010 et spécialisée dans le domaine. Leurs capteurs (IIoT) ne nécessitent aucun branchement, se collent sur les équipements et offrent une autonomie intéressante (une pile dure environ 2 ans).

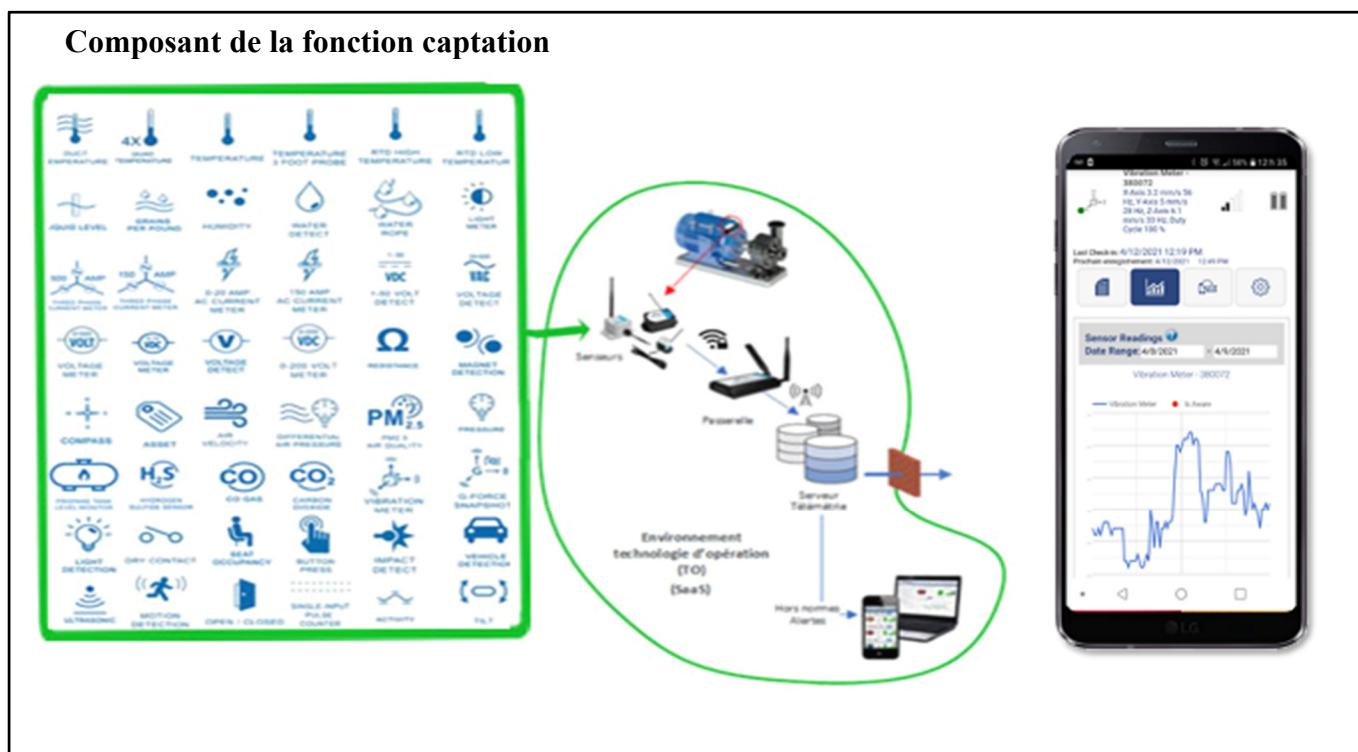


Figure 5.4 Composants de la fonction captation

³ <https://www.monnit.com/>

5.4.4 Fonction intégration

La fonction intégration se divise en trois parties : le transfert des données, l'intégration et l'inférence.

Étant donné que *FMDS 4.0* est un système d'entrée de gamme, la suite MS Office a été utilisée comme base. Celle-ci répond aux besoins, elle est bien connue des équipes de technologies d'information (TI) et a peu de chance d'être refusée par ceux-ci particulièrement en matière de sécurité.

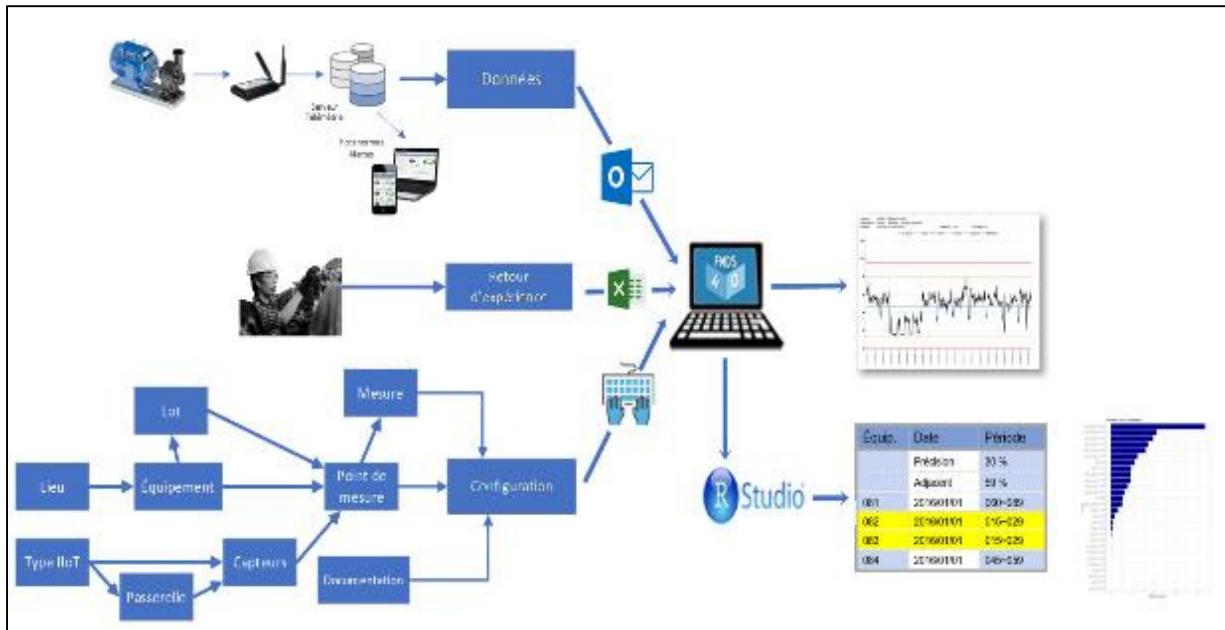


Figure 5.5 Fonction intégration

Le transfert de données

Cette partie permet le transfert des paramètres physiques suivis vers le logiciel d'intégration.

Les données des capteurs sont transférées journalièrement du serveur SaaS vers *FMDS 4.0* par courriel. Puis, les données sont dans le dossier *FMDS*. Ce choix pour transférer l'information

priorise la sécurité et la facilité d'implantation. La sécurisation de ce seul lien externe du système étant assurée par le service des TI.

Les données transférées sont anonymisées et prendront un sens lors de l'intégration.

Tableau 5.4 Exemple de données transférées

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	DataMessageGUID	SensorID	Date	Battery	Raw Data	Sensor State	Signal Strength	Voltage
2	a1454f2d-20d3-4547-9190-a2bedd1a93d7	362385	02/06/2021 12:15 AM	100	0.25,0.99,1.05,0.95	0	100	2.98
3	ff69675a-c297-4fc0-b037-d9d7cebc2b7	362385	02/06/2021 12:30 AM	100	0.24,0.98,1.03,0.74	0	100	2.99
4	a79332c4-6f9e-43db-bdb6-e36c0aae35b4	362385	02/06/2021 12:45 AM	100	0.24,0.95,0.96,0.95	0	95	2.99
5	42629a2a-a2fd-4ae7-b431-eacc1e4270d4	362385	02/06/2021 1:00 AM	100	0.24,0.95,0.96,0.95	0	87	2.99
6	c436fa9d-b396-4c1f-8d2d-c4ced3a8f174	362385	02/06/2021 1:15 AM	100	0.25,0.99,1.03,0.95	0	100	2.99
7	20583f1e-17ba-4a29-b5ac-cadfb77c737a	362385	02/06/2021 1:30 AM	100	0.25,1,1.03,0.95	0	97	2.99
8	e31d93e9-c5c3-49a1-9cb9-2da8c77ebf40	362385	02/06/2021 1:45 AM	100	0.23,0.95,0.96,0.95	0	100	2.99
9	d3589b44-3180-4eae-8fe7-adc909d55d98	362385	02/06/2021 2:00 AM	100	0.24,0.95,0.95,0.95	0	100	2.99
10	0f8432e2-b6e9-49d4-9fdf-bcdb751dc321	362385	02/06/2021 2:15 AM	100	0.25,0.99,1.03,0.95	0	100	2.98

L'intégration

L'intégrateur reçoit les données des capteurs, les met en relation avec les retours d'expérience et permet la configuration des divers éléments du système et des liens entre eux. Il produit des analyses graphiques et prépare les données pour le logiciel d'inférence.

L'intégrateur a été réalisé avec un logiciel de gestion de base de données. Il intègre les tables, les formulaires, les rapports, les requêtes, les macros et les modules de codes dans un même fichier facilitant son utilisation par les néophytes. Vadeboncoeur (2014) rapporte son utilisation par plus de 200 utilisateurs à la STM avec de très bons résultats. Le logiciel offre des capacités suffisantes pour répondre aux besoins. De plus, en cas de dépassement de capacité, il est facilement possible de basculer vers une infrastructure (backbone) basée sur SQL Server.

The image shows a screenshot of the FMDS 4.0 software interface. The top navigation bar includes the FMDS 4.0 logo, the word 'ACCEUIL', and a 'Déconnexion' button. The left sidebar has a 'OptiGén' logo and a 'GÉNÉRATEUR D'OPTIMISATION' section. The main area is divided into six cards:

- INFRASTRUCTURE:** Shows a 3D model of a factory and includes 'Lieu', 'Type d'équipement', and 'Équipements' sections.
- INTERNET DES OBJETS (IOT):** Shows a 3D model of a factory and includes 'Type de lieu', 'Passeurelles', 'Capteurs', 'Lot', and 'Point de données' sections.
- TELEMÉTRIE:** Shows a 3D model of a factory and includes 'Télémétrie et analyse graphique'.
- RETOUR D'EXPÉRIENCE:** Shows a 3D model of a factory and includes 'Paramètres', 'Saisie', 'Importer données (.xls)', and 'Analyse' sections.
- CONDITIONS D'EXÉCUTION:** Shows a 3D model of a factory and includes 'Paramètres', 'Saisie', 'Importer données (.xls)', and 'Analyse' sections.
- MAINTENANCE PRÉVISONNELLE:** Shows a 3D model of a factory and includes 'Paramètres', 'Matrice de confusions', 'Influence relative', and 'Prévision' sections.

Below these cards, a section titled 'ENREGISTREMENT TÉLÉMÉTRIQUES' displays a table of data. The table has columns for 'Lot', 'Point', 'ID_Sensor', 'Date', and various data points (1-6, Calc Data, Unit, Hs, min). The table shows multiple rows of data for different sensors across various lots and dates.

At the bottom, a 'DÉTAIL CAPTEUR' section is shown for a sensor with ID 447574. It shows the type 'MNS2 9 W1VW 005 Alta WI Meter 0-5 Vdc Coin Cell Powered 300 MHZ' and a detailed configuration form with fields for 'Id_sensore', 'Statut', 'Type', 'SC_Id', 'Passeurelle', 'Fabricant', 'DateAchat', and 'Remarque'.

Figure 5.6 Capture d'écran du logiciel l'application *FMDS 4.0*

L'inférence

Bien qu'il soit possible de faire des inférences simples directement à partir des graphiques produits par l'intégrateur, il peut être très intéressant d'utiliser des outils d'analyse plus approfondie pour suivre l'état de ses équipements.

Sur demande, l'intégrateur fournit les données pertinentes au programme d'analyse et lance la production du rapport prévisionnel. On retrouvera, au chapitre quatre, les détails d'un rapport prévisionnel produit par le programme.

Le moteur d'inférence a été créé dans l'environnement R Studio. C'est un environnement de développement intégré (IDE) pour le langage de programmation R qui est consacré aux statistiques et aux bases de données. Un IDE comprend une console, un éditeur syntaxique qui prend en charge l'exécution directe de code, ainsi que des outils de traçage, d'édition de rapport, d'historique, de débogage et de gestion de l'espace de travail⁴.

⁴ Source : <https://www.rstudio.com/products/rstudio/>

5.5 Impact sur la gestion des connaissances

La démarche d'implantation du système proposé peut être une occasion d'améliorer la maîtrise des équipements maintenus, de leurs performances, de leurs modes de dégradations et des interactions entre ceux-ci via la gestion des connaissances. Selon Foray (2009), une telle connaissance est vue comme un facteur clé de succès et comme la base d'un avantage concurrentiel.

Selon Ermine, Moradi & Brunel (2012), la gestion des connaissances a pour objet de gérer cette intégration de ressources dans les processus de l'entreprise. Pour aider à son succès, il est donc utile d'analyser la chaîne de valeur de connaissance (CVC) dans la firme, afin d'identifier et gérer les différents stades fondamentaux d'enrichissement de cette ressource cognitive et de son incorporation dans l'activité de l'entreprise.

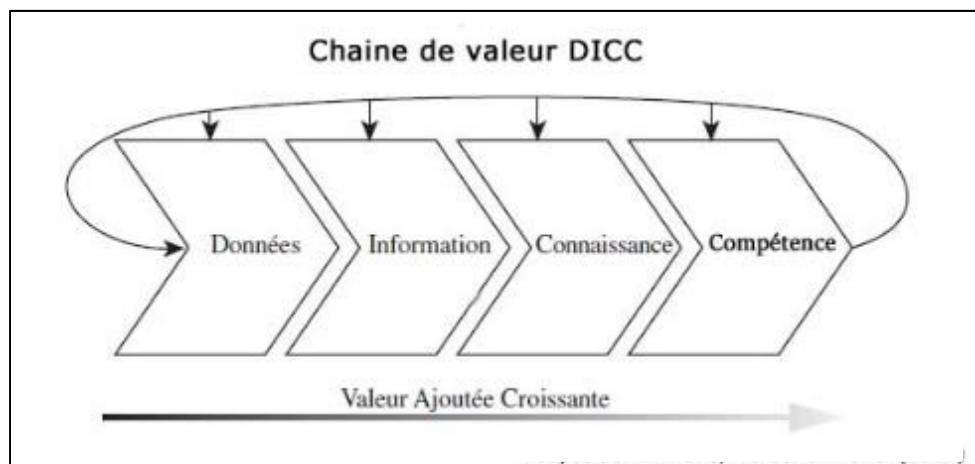


Figure 5.7 Chaîne de valeur DICC
Tiré de Ermine, Moradi & Brunel (2012)

Ermine, Moradi & Brunel (2012) soulignent que le modèle DICC (donnée → information → connaissance → compétence) est un des plus célèbres dans la littérature sur l'information et la connaissance et est considéré d'ailleurs comme « allant de soi ». Il est largement utilisé dans le management de l'information et de la connaissance.

Le modèle de chaîne de valeur de connaissance (CVC) qui en découle s'applique particulièrement bien à la démarche proposée, voyons les étapes :

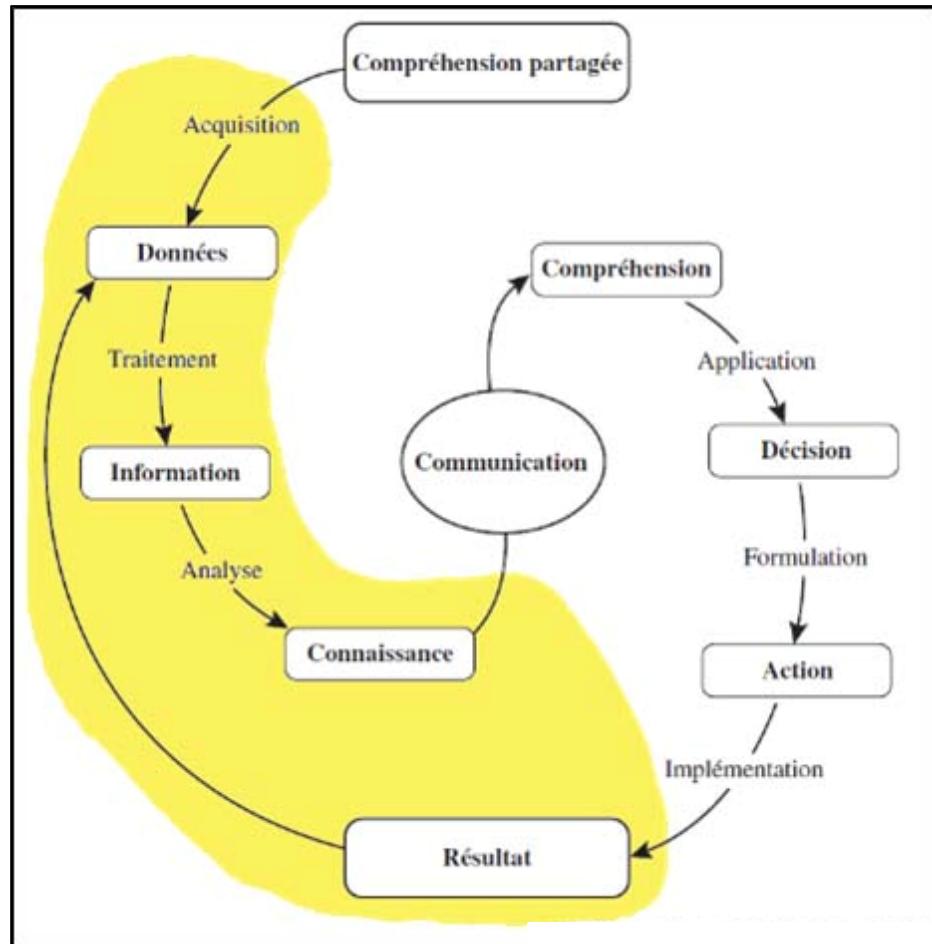


Figure 5.8 Zone d'influence du système (en jaune) sur le modèle CVC

Tiré de Ermine, Moradi et Brunel (2012), jaune ajouté

5.5.1 Compréhension partagée, la connaissance empirique

Dans beaucoup d'environnements de maintenance où il y a peu d'assistance technique, outre la formation de base et les manuels laissés par le fournisseur, le transfert de connaissance se fait par compagnonnage, souvent au fur et à mesure. Il repose sur le partage de la compréhension commune des intervenants sans avoir nécessairement de rigueur scientifique. Les références sur l'expérience passée se font avec peu ou pas de documentation.



Figure 5.9 Connaissances empiriques

Bien que cette méthode fonctionne relativement bien dans un environnement stable, elle peut s'avérer critique lors du départ du personnel d'entretien ou lors de remplacement d'équipement. De plus, elle supporte peu un processus d'optimisation des ressources tant par un manque d'historique qu'une méconnaissance factuelle des processus de dégradation.

5.5.2 Crédit de données, l'acquisition



chronologiques. Une donnée est un élément brut qui n'a pas encore été interprété et qui est mis en contexte par exemple : *Le capteur 95865 donne 10.3 le 2020-03-12 à 22 h 10.*

L'acquisition de données est réalisée par le module de captation. Pour les IIoT, les paramètres physiques sont lus par les capteurs qui les transmettent via une passerelle vers une base de données.

5.5.3 Crédit des informations, la contextualisation

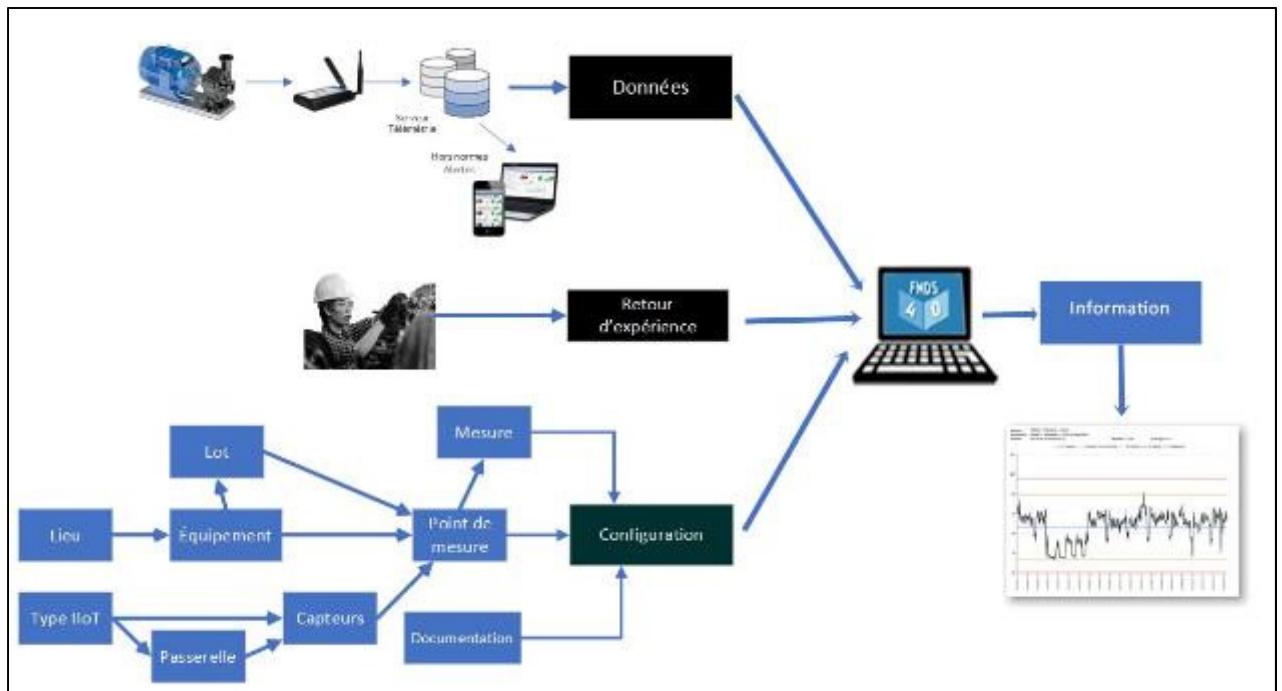


Figure 5.11 Crédit des informations

La contextualisation des données vise à leur donner un sens. Une information est une donnée interprétée et contextualisée, par exemple : *la vibration de la pompe dépasse la limite de 35 mm/s.* Notons qu'il est possible d'en être directement alerté en temps réel par un cellulaire ou tout autre moyen.

Pour créer l'information, on intègre aux données le contexte, soit le retour d'expérience et la configuration du système. Dans ce cas, on relie les données à la structure des objets de maintenance et au retour d'expérience. L'information permet au personnel de maintenance de mieux comprendre l'état des équipements.

Les premiers modèles Ford T n'avaient pas de lecteur pour le niveau d'essence. L'utilisateur devait régulièrement vérifier le niveau d'essence avec une jauge pour éviter la panne sèche. Cette démarche peut sembler anachronique aujourd'hui, mais on se retrouve sensiblement dans la même situation lorsqu'un employé doit vérifier périodiquement un paramètre d'un équipement pour éviter les pannes, par exemple l'encrassement des filtres.

Prenons comme exemple deux ventilateurs équivalents qui sont suivis pour la vibration et de l'ampérage consommé :

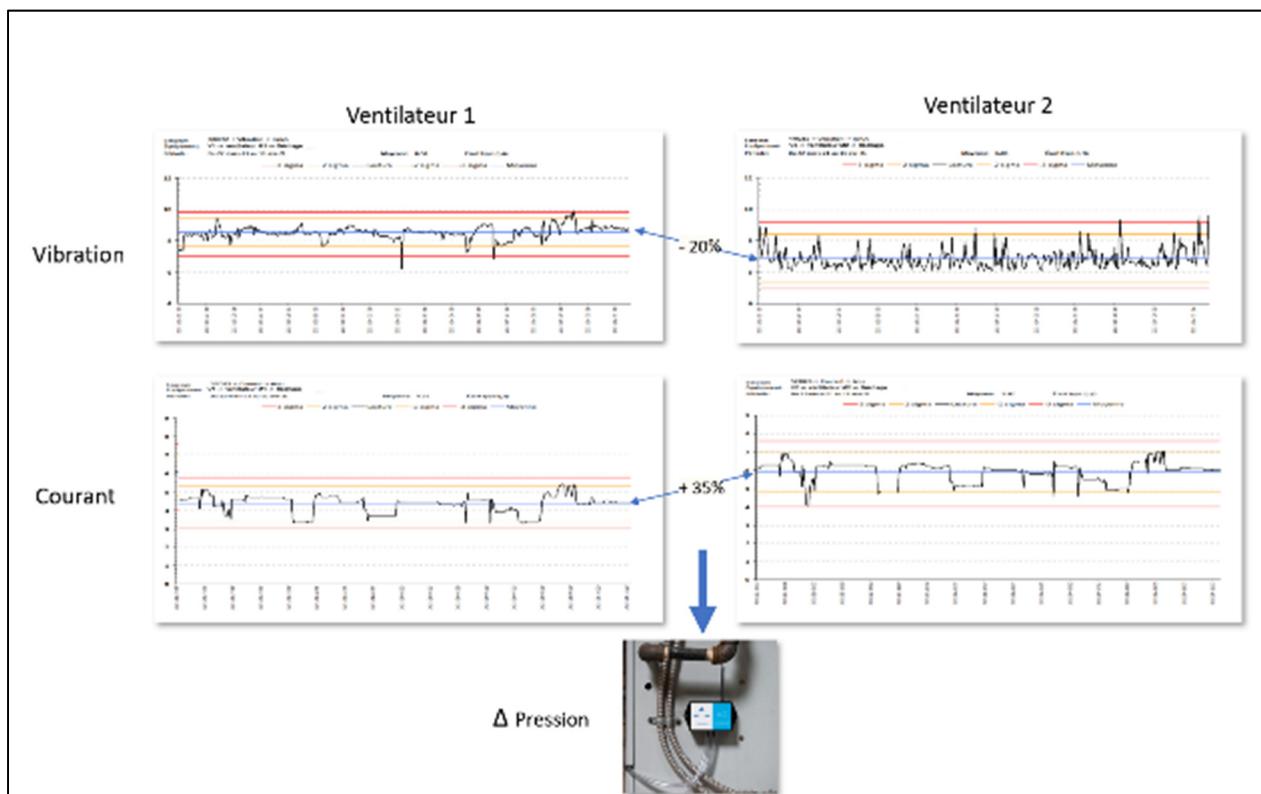


Figure 5.12 Graphique de suivi de deux ventilateurs

On constate que le ventilateur 2 vibre 20 % de moins que le ventilateur 1. On constate aussi que le ventilateur 2 consomme 35 % plus de courant. On peut en déduire qu'il est probable que le ventilateur 2 force plus. Il s'agira par la suite de confirmer avec le suivi du différentiel de pression. Cette situation peut être normale en fonction du système, par exemple si la charge n'est pas équivalente, mais peut aussi être un indicateur d'obstruction, par exemple un filtre encrassé.

Ce type de validation d'hypothèse permet d'améliorer la compréhension des processus de dégradation et performance des équipements et d'ajuster au besoin les caractéristiques limites acceptables.

Signature de l'équipement

L'exemple précédent présente l'intérêt de connaître la signature des équipements. Une signature d'équipement est l'ensemble des éléments qui permettent de caractériser la présence, le type, l'état ou l'identité d'un objet par un capteur. Elle est caractéristique de l'équipement et dépendra de sa conception initiale, de ses conditions d'utilisations et de son état. Dans l'exemple, même si les deux équipements ont le même âge et modèle, on peut voir que leurs signatures diffèrent fortement.

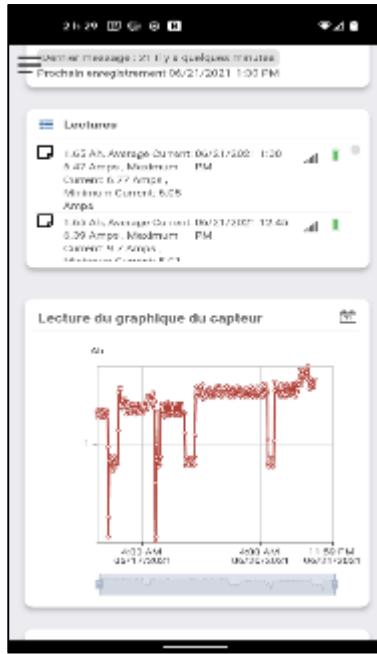


Figure 5.13 Lecture du capteur

De plus, l'analyse statistique de la signature permet de produire la carte de contrôle de l'équipement. On peut y identifier deux niveaux de variation soit de 2σ qui correspond à la probabilité de 97.72 % qu'il y ait quelque chose d'anormal pour l'équipement et 3σ qui correspond à la probabilité de 99.86 % (voir ligne jaune et rouge figure 2.6).

Selon Krishnamoorthi (2019), l'intérêt de cette information est de pouvoir créer un niveau de préalarme à 2σ et d'alarme à 3σ . Ces alarmes seront transmises par texto, ou tout autre moyen, à l'équipe de maintenance qui interviendra, au besoin, beaucoup plus tôt dans le processus de défaillance de l'équipement minimisant ainsi les impacts. L'autre intérêt de ce niveau d'alarme est de minimiser les faux positifs et les dérangements qui s'en suivent. Finalement, on peut aussi consulter directement les lectures, via un cellulaire, les lectures afin juger de la pertinence de l'intervention.

5.5.4 Crédit de la connaissance, l'analyse

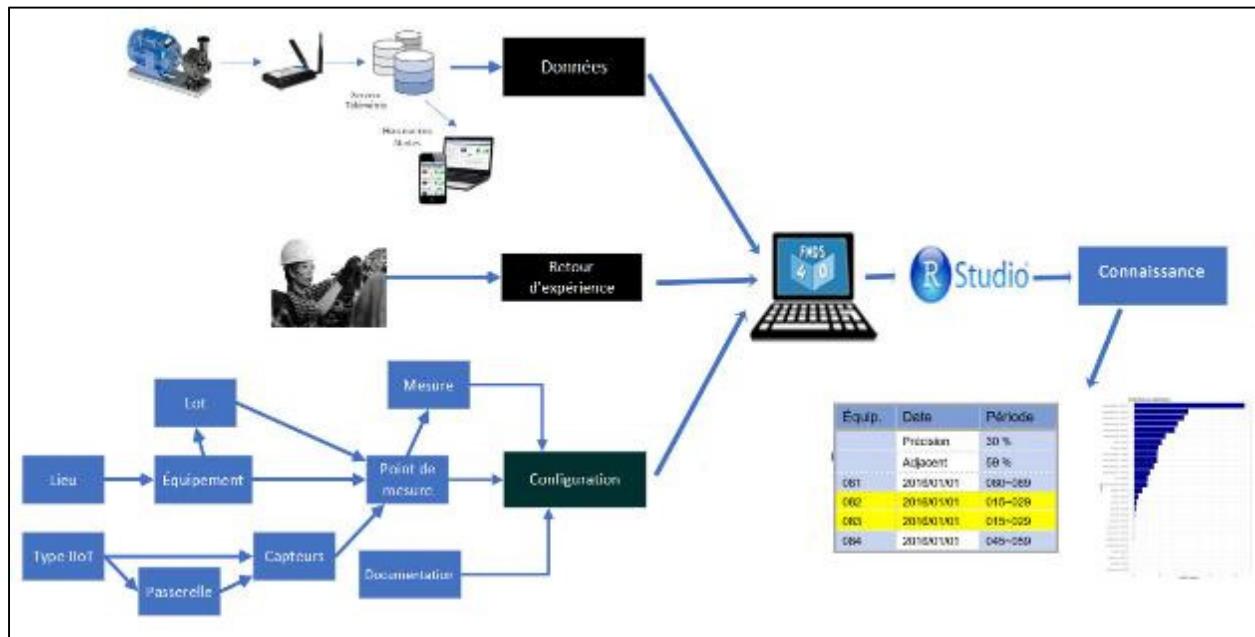


Figure 5.14 Moteur d'analyse

La connaissance du système peut être créée directement par l'analyse des intervenants, par exemple, lors d'inférence à la contextualisation (5.4.3). L'utilisation d'un moteur d'analyse prévisionnelle permet d'inférer beaucoup plus intensivement les diverses informations dans le but de créer de nouvelles connaissances et de mettre en œuvre des actions compte tenu de la situation. Exemple :

La probabilité que la pompe 82 tombe en panne d'ici 15 à 44 jours est de 59 %

Dans l'application *FMDS 4.0*, cette fonction est traitée par un programme R Studio. Le résultat est un rapport prévisionnel que l'on présentera au chapitre 4. Il porte sur les performances d'entretien, la répartition des coûts, les prévisions de pannes et l'influence relative des variables.

5.6 Tendances en matière d'adoption de l'IIoT pour 2022

L'approche proposée, dans le cadre de ce mémoire, vise à démystifier et à faciliter l'implantation de la maintenance 4.0 via des projets de petites ampleurs supportés par un système d'entrée de gamme. Elle cadre très bien dans les principales tendances actuelles. Wegner (2021) rapporte ces principales tendances pour 2022 :

1. **L'adoption de l'IoT s'accélère.** Selon son rapport, 79 % des grandes organisations envisagent d'investir des sommes importantes dans au moins un projet IoT au cours des deux prochaines années.
2. **Les cas d'utilisations axés sur l'amélioration des opérations et des actifs sont en hausse.** Si l'adoption de l'IOT est forte dans tous les domaines, les cas d'utilisation centrés sur les actifs et les opérations semblent être les plus demandés. Les cas d'utilisation de la maintenance prévisionnelle (c'est-à-dire l'augmentation de l'utilisation des actifs en prévoyant les temps d'arrêt non planifiés des actifs) devraient faire l'objet d'investissements importants au cours des deux prochaines années.
3. **Les initiatives en matière d'IoT connaissent un succès croissant.** En 2017, Cisco a rapporté de façon célèbre que 60 % de tous les projets IoT échouent, et que seulement 26 % des entreprises déclarent avoir un projet IoT qui a été un succès complet. Cependant, la réalité sur le terrain a changé. Sur les quelque 1 600 projets IoT de son analyse, 79 % ont dégagé un retour sur investissement positif.
4. **La pénurie de talents dans le domaine de l'IoT devrait rester un défi permanent dans les années à venir.** Mais comme de nombreux intégrateurs ont créé des unités commerciales spécifiques à l'IoT, une solution à ce problème est désormais disponible.
5. **L'écart entre les leaders et les retardataires en matière d'adoption se creuse.** On pourrait penser que les entreprises qui n'ont pas commencé leur voyage IoT vont

maintenant se réveiller et combler l'écart avec celles qui ont déjà adopté. Les données montrent le contraire. Les entreprises qui ont beaucoup investi dans l'IoT ces dernières années augmentent leurs investissements encore plus que les retardataires de l'adoption. L'écart entre les leaders et les retardataires se creuse donc toujours plus.

6. La complexité des projets IoT reste un défi majeur. Les projets IoT peuvent être complexes, et cette complexité reste un défi majeur pour l'adoption de l'IoT. Ces dernières années, les fournisseurs ont déployé de nombreux efforts pour simplifier l'IoT. Ils ont notamment développé des modèles de solutions prêtes à l'emploi, des outils de connexion de dispositifs de provisionnement⁵ simple et des modèles de paiement à l'usage pour les logiciels et le matériel. Les fournisseurs ont également introduit des composants logiciels modulaires qui peuvent être utilisés en fonction des besoins et incluent des connecteurs à d'autres applications populaires. Cependant, les utilisateurs interrogés dans le cadre de leur étude considèrent toujours la complexité comme le principal point sensible. Il n'est donc pas surprenant que le conseil le plus courant pour démarrer avec l'IoT soit d'effectuer des tests appropriés et d'assurer la preuve du concept avant de déployer la solution. Cela met en évidence la complexité des cas d'utilisation de l'IoT.

5.7 **Implantation en entreprise**

Durant la réalisation de ce mémoire, le processus d'implantation a démarré dans deux importantes entreprises, malgré des conditions défavorables (pandémie).

L'aspect progressif a permis aux équipes de maintenance de débuter avec un risque financier et organisationnel minimal. Il a aussi permis une prise en main graduelle et un changement de paradigme sur la maintenance 4.0.

⁵ Dispositif qui permet d'allouer automatiquement des ressources informatiques ou de télécommunication afin de répondre à une variation d'activité d'un utilisateur. Réf. <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire>

Par exemple, dans une des entreprises, nous avons pu percevoir une augmentation relativement constante des vibrations sur une pompe au taux de 1.2 %/mois depuis 6 mois. L'objectif étant de suivre l'équipement et de corroborer ces informations avec les observations des interventions de maintenance.

Les démarches sont encore en cours et, conditionnellement aux résultats (réaction du système lors de pannes), il y a une volonté des deux entreprises d'augmenter le nombre d'équipements suivis et de poursuivre la démarche.

5.8 Récapitulatif

On utilise les inhibiteurs identifiés au chapitre deux pour paramétrier les critères de conception d'une démarche d'introduction à la maintenance 4.0. De plus, on souligne la possibilité de créer un avantage concurrentiel, pour l'entreprise, de la gestion des connaissances de maintenance et l'impact de la démarche sur celle-ci.

Le système proposé, *FMDS^{4.0}*, inclut :

- Une démarche d'implantation qui s'inspire de l'approche Agile ;
- La fonction captation qui utilise un service SaaS et permet la capture des paramètres physiques pertinents ;
- Les fonctions d'intégration et d'inférence, basées sur la suite MS Office et R-Studio, qui permet de contextualiser l'information et de créer de nouvelles connaissances.

De plus, la facilité de déploiement des IIoT ainsi que la pertinence des données recueillies et traitées en font des outils privilégiés lors de processus de résolution de problème. Finalement, le système proposé a suscité l'intérêt de deux entreprises importantes et les implantations en cours sont prometteuses.

5.9 Conclusion

Le chapitre cinq propose un système conçu pour faciliter son implantation en entreprise. Il se divise en trois parties : la démarche, la captation et l'intégration. Il peut aussi soutenir les démarches de résolution de problèmes.

Le système permet, en limitant les besoins en ressources financières et humaines, l'introduction de la maintenance 4.0 à un rythme qui respecte le milieu, tant dans le domaine de l'acquisition de nouvelles compétences que pour l'exploration des applications possibles. Pour faciliter la démarche, l'accompagnement d'un professionnel du domaine est cependant souhaitable.

CHAPITRE 6

RAPPORT PRÉVISIONNEL

6.1 Introduction

Le chapitre 4 propose un système d'entrée de gamme facilitant la démarche d'introduction de la maintenance 4.0. On y rapporte que la fonction inférence est réalisée par un programme créé dans l'environnement R Studio. Ce programme utilise les informations disponibles dans la base de données, soit les lectures des capteurs, les retours d'expérience et la configuration du système et il produit un rapport prévisionnel (RP).

Ce n'est pas un élément très structuré dans les implantations GMAO. À preuve lors de la conférence Maintenance industrielle – 5^e édition – 2014 sur l'implantation d'une GMAO de classe mondiale, Vadeboncoeur (2014) concluait sa présentation sur l'observation que, malgré le succès de l'implantation et la quantité d'informations récoltées, il ne disposait pas encore d'un outil d'analyse en vue d'une démarche d'amélioration continue de la maintenance du parc.

Sur ce sujet, Hétu (2018) mentionne que l'implantation de cette GMAO répondait à 95 % des besoins du groupe administratif, 80 % des besoins du groupe planification, mais seulement 20 % des besoins du groupe de maintenance incluant l'Ingénierie, ce manque étant particulièrement regroupé pour la fiabilité et l'efficacité opérationnelle. Le rapport prévisionnel (RP) se veut une solution à ce type de problème. Il est automatisé et peut être adapté à chaque environnement de maintenance.

6.2 Objectif du rapport prévisionnel

La majorité des équipes de maintenance ont peu d'outils de suivi de performance, à part le taux de réalisation des programmes préventifs et du coût total des interventions par secteur. Quelques équipes ont aussi un suivi du temps moyen entre pannes (MTBF). Cependant, dans un environnement où il y a de plus en plus de données disponibles, l'exercice d'en tirer systématiquement des informations qui faciliteront une amélioration continue des processus peut être plutôt ardu et souvent non réalisé ou non réalisable.

Le RP peut être un apport important dans la chaîne de valeur de connaissance. Il fournit un suivi temporel de l'état des équipements et de l'efficacité des interventions de maintenance. Par la suite, il permet d'isoler l'influence de différents facteurs sur les résultats, tel le MTBF. De plus, il produit une prévision statistique des pannes à venir sur les équipements. Finalement, il peut être utilisé en journal de bord comme outil de discussions et suivi pour les réunions des équipes de maintenance. On retrouvera, en annexe III, un exemple de rapport prévisionnel intégral, notons que celui-ci est conçu pour être adapté aux besoins de l'entreprise.

6.3 Principales parties du rapport prévisionnel

Le rapport consigne l'état de la maintenance pour un groupe d'équipements donnés à une période donnée. Puis, il calcule une prévision sur la période de défaillance de chaque équipement avec un taux de probabilité. Finalement, il fournit en annexe un tableau des interventions qui ont nécessité une intervention ultérieure à moins de 20 % du MTBF.

6.3.1 Identification et mise en contexte

Un des buts du rapport prévisionnel est de soutenir la gestion de la connaissance. Ces deux parties du rapport en identifient la portée du rapport tant au niveau temporel que de l'objet visé. On y retrouvera les conditions particulières du contexte de saisie. On y retrouve aussi la classification des MTBF.

1. Identification		
No. rapport: 210503		
Client: Interne		
Mandat: Tête de série de rapport prévisionnelle		
Analyste: Robert Vadeboncoeur, ing.		
Équipement: 081 - 084		
Date de production: lun. 03 mai 2021 16:55:05		
Type: Rapport automatisé (Version régulière)		
2. Mise en contexte		
Le rapport prévisionnel fournit l'état de la fiabilité et la maintenance d'un groupe d'équipements. Il vise à améliorer la compréhension des différents aspects touchant la performance des équipements. Il est produit sur demande à partir du système FMDS.		
Suite à l'analyse des intrants et résultats du système, quatre modèles prévisionnels sont utilisés pour mettre en lumière les dynamiques des pannes des équipements.		
Finalement, on retrouve une prévision multiclassee des prochaines pannes.		
Pour l'exercice, les données utilisées proviennent de Boylu Uz, Fidan (2016), Predictive Maintenance Modelling Guide R Notebook ,Azure AI Gallery.		
Regroupement par classe des durées de vie		
No	Classe	Durée_vie_probable
1	000~004	0-4 jours
2	005~014	5-14 jours
3	015~029	15-29 jours
4	030~044	30-44 jours
5	045~059	45-59 jours
6	060~089	60-89 jours
7	090~119	90-119 jours
8	120+	120 jours et +

Figure 6.1 Exemples d'identification du rapport

6.3.2 Sources de données

Le rapport utilise trois sources de données principales : les caractéristiques des équipements, la télémétrie et l'historique des interventions.

Caractéristiques des équipements

On retrouve, au chapitre 3.1 du RP, les caractéristiques de l'équipement : identifiant, nom, modèle-fabricant, âge, répartition par modèle.

3.1. Équipements

L'analyse porte sur un groupe de 4 séchoirs industriels.

Les informations sur les équipements sont: le numéro d'équipement, l'identifiant, le modèle et l'âge, qui correspond au nombre d'années en service.

Nombre d'équipement: 4

3.1.1. Liste des équipements

Equip_ID	NomEquip	Modele	age	DispSem
081	Equip_81	model4	1	40
082	Equip_82	model3	11	40
083	Equip_83	model4	18	40
084	Equip_84	model3	9	40

3.1.2. Répartition des équipements par âge/modèles

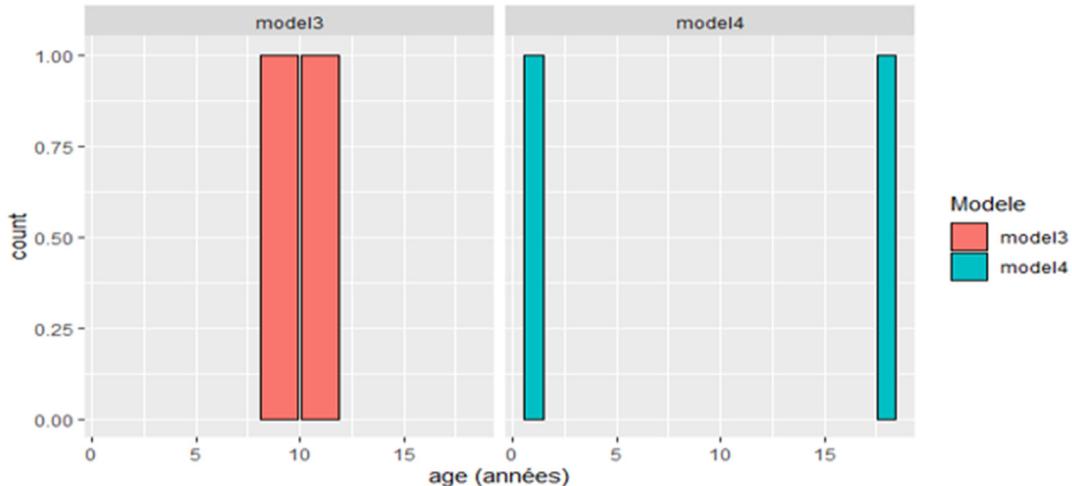


Figure 6.2 Exemples de description des équipements

Télémétrie

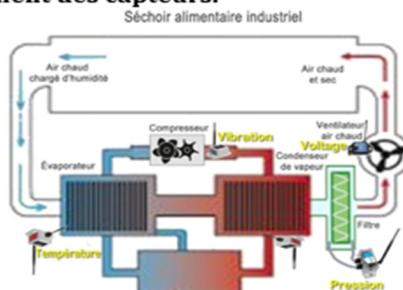
La télémétrie est l'inscription chronologique des mesures physiques enregistrées par les capteurs telles que la pression, la vibration, la température, la tension par les capteurs. On y retrouve un schéma d'installation de ces capteurs et les premières lignes des données transférées et un graphique non traité des lectures du premier capteur.

3.2. Télémétrie

La principale source de données est la série chronologique de télémétrie. Elle comprend les mesures physiques telles que la pression, la vibration, la température, le voltage ... Ces mesures sont collectées en temps réel par équipement, et la moyenne de toutes les heures collectées au cours de la période d'analyse est transmise.

Afin d'améliorer la qualité des prévisions, il est important de s'assurer que les capteurs de télémétrie retenus soient susceptibles de détecter une détérioration des composants. On peut, par exemple, tester avec plusieurs types/localisations de capteurs ceux qui sont le plus efficaces et ne retenir que ceux-ci.

3.2.1. Schéma de positionnement des capteurs.



Nombre total d'enregistrements : 35040

Période couverte: 2015-01-01 au 2016-01-01

3.2.2. Entête de liste

Date/Heure	Equip_ID	volt	temp	pression	vibration
2015-01-01 06:00:00	081	179.9798	387.2182	100.0197	37.32758
2015-01-01 07:00:00	081	188.5138	486.5026	108.1079	39.76838
2015-01-01 08:00:00	081	181.8109	407.5267	116.9360	42.16622
2015-01-01 09:00:00	081	193.6626	469.5789	84.6295	35.56664

3.2.3. Lecture du premier capteur (volt)

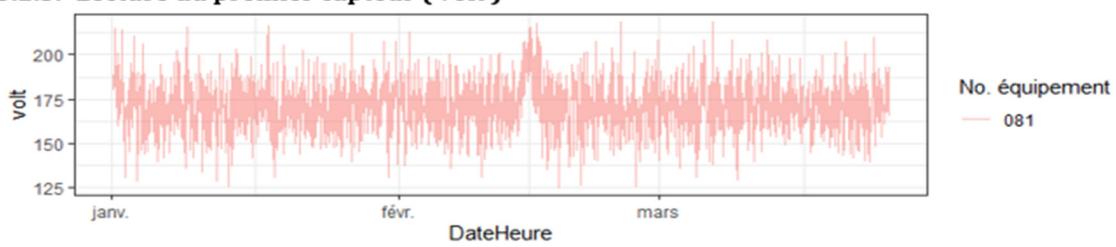


Figure 6.3 Exemple de description de la télémétrie

Historique des interventions

Les retours d'expérience du personnel d'entretien permettent de tenir compte des interventions réalisées sur les équipements. Ils sont présentés, par sous-chapitre, en trois types : préventif, correctif (dégradation n'ayant pas causé d'arrêt de fonction) et curatif (dégradation ayant causé un arrêt de fonction).

Dans chaque sous-chapitre, on retrouve :

- L'en-tête de liste des données transférées ;
- Un tableau croisé du nombre d'entretiens par composant et par équipement ;
- Un tableau croisé du temps moyen entre deux entretiens par composant et par équipement, ce tableau permet de faire ressortir les différences de performance entre les composants et/ou équipements ;
- Un graphique de la répartition des interventions en fonction du nombre de jours depuis la dernière intervention. Sur ce graphique, on retrouve aussi le nombre de fois qu'il y ait eu deux interventions ou plus sur le même équipement la même journée (double). On peut y retrouver des profils de survie des équipements/composants ;
- Pour l'entretien curatif, on retrouve, de plus, la répartition globale de la vie utile résiduelle des équipements.

3.3. Entretien préventif

Les actions de maintenance préventive ont pour but de réduire les arrêts de production coûteux et perturbant la production afin de conserver le niveau de service dans les normes attendues. Un enregistrement est généré pour chaque composant suivi lors de l'entretien préventif. Le TTR est exprimé en jours.

2 doublon(s) ont été supprimé(s)

Nombre total d'enregistrements d'entretien préventif: 142

3.3.1. Entête de liste

Date/Heure	Equip_ID	Cost	TTRJrs	Ordre	Matricule	Composant	Trimestre
2015-01-02 06:00:00	081	103	0.81	64446	125	comp3	1
2015-01-02 06:00:00	081	20	0.69	64447	96	comp1	1
2015-01-17 06:00:00	081	22	0.57	64095	125	comp2	1
2015-02-16 06:00:00	081	42	0.45	73148	112	comp1	1

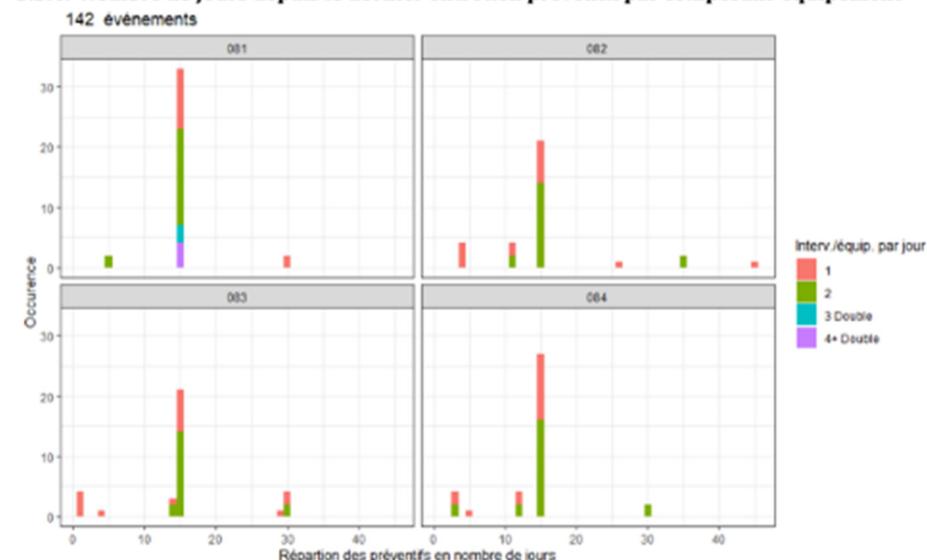
3.3.2. Nombre d'entretien préventif par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp3	comp4	Global
081	13	9.0	10	5	37.0
082	13	5.0	9	6	33.0
083	7	9.0	8	10	34.0
084	7	11.0	9	11	38.0
Moyenne	10	8.5	9	8	35.5

3.3.3. Temps moyen (jr) entre deux entretiens préventifs par composant-équipement

No Equip	comp1	comp2	comp3	comp4	Global
081	28.1	40.6	36.5	73.0	9.9
082	28.1	73.0	40.6	60.8	11.1
083	52.1	40.6	45.6	36.5	10.7
084	52.1	33.2	40.6	33.2	9.6
Moyenne	36.5	42.9	40.6	45.6	10.3

3.3.4. Nombre de jours depuis le dernier entretien préventif par composant-équipement



3.3.5. Distribution des interventions/équipement/journée

Interv./équip./jour	Occurrence
1	59
2	76
3 Double	3
4+ Double	4

Figure 6.4 Exemple d'historique d'entretien préventif

3.4. Entretien Correctif

La maintenance corrective est une intervention qui apporte une amélioration des performances et des conditions de production. Elle permet l'installation de machines neuves et la remise en état, le reconditionnement et le déplacement des machines existantes sur site ou en atelier. Ce sont des composants remplacés ou actions effectuées lors de l'entretien correctif (faute), c'est-à-dire que l'équipement est toujours opérationnel et ne constituent pas une interruption de la mission de l'équipement.

Nombre total d'enregistrements d'entretien correctif: 155

3.4.1. Entête de liste

DateHeure	Equip_ID	Cost	TTRJrs	Ordre	Matricule	Composant	Trimestre
2015-01-01 06:00:00	081	107	1.16	63577	96	comp1	1
2015-01-16 06:00:00	081	57	0.83	63977	125	comp2	1
2015-01-16 06:00:00	081	141	1.32	63983	96	comp3	1
2015-01-19 18:00:00	081	146	1.55	64297	96	comp4	1

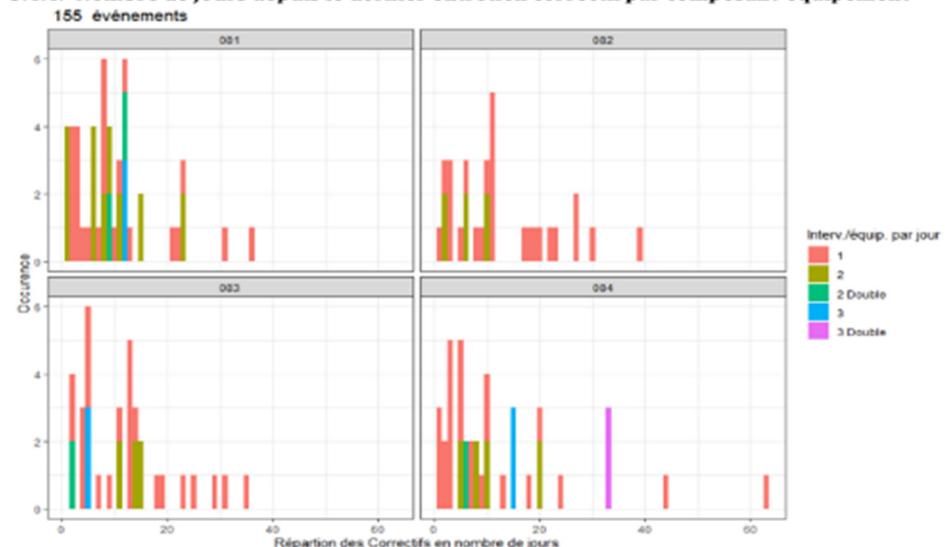
3.4.2. Nombre d'entretien correctif par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp3	comp4	Global
081	19.0	14.0	8.0	8.0	49.0
082	11.0	8.0	5.0	7.0	31.0
083	8.0	11.0	13.0	3.0	35.0
084	16.0	10.0	11.0	3.0	40.0
Moyenne	13.5	10.8	9.2	5.2	38.8

3.4.3. Temps moyen (jrs) entre deux entretiens correctifs par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp3	comp4	Global
081	19.2	26.1	45.6	45.6	7.4
082	33.2	45.6	73.0	52.1	11.8
083	45.6	33.2	28.1	121.7	10.4
084	22.8	36.5	33.2	121.7	9.1
Moyenne	27.0	33.8	39.7	70.2	9.4

3.4.4. Nombre de jours depuis le dernier entretien correctif par composant-équipement



3.4.5. Distribution des interventions/équipement/journée

Interv./équip./jour	Occurrence
1	97
2	38
2 Double	8
3	9
3 Double	3

Note: Double signifie qu'il y a au moins 2 interventions pour le même composant/équipement/journée.

On retrouve, en annexe, le tableau des entretiens réalisés à moins de 20% du temps moyen entre les correctifs.

Figure 6.5 Exemple d'historique d'entretien correctif

3.5. Entretien curatif

Ce sont des retours techniques de remplacements de composants suite à un arrêt de la mission de l'équipement. La maintenance curative est un dépannage prioritaire, car les arrêts de production provoquent des pertes lourdes pour les entreprises. Chaque enregistrement (Panne) contient une date/heure, l'ID de l'équipement et un type de composant défaillant.

Nombre total d'enregistrements de curatif : 33

3.5.1. Entête de liste

Date/Heure	Equip_ID	Cost	TTRJrs	Ordre	Matricule	Composant	Trimestre
2015-01-02 06:00:00	081	234	2.97	64414	125	comp1	1
2015-01-17 06:00:00	081	333	2.43	64060	125	comp2	1
2015-02-16 06:00:00	081	396	2.15	73110	125	comp1	1
2015-03-03 06:00:00	081	315	4.52	75916	112	comp2	1

3.5.2. Nombre d'entretien curatif par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp4	Global
081	2	6.0	0.0	8.0
082	3	1.0	0.0	4.0
083	4	4.0	6.0	14.0
084	3	4.0	0.0	7.0
Moyenne	3	3.8	1.5	8.2

3.5.3. Temps moyen (jr) entre deux entretiens curatifs par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp4	Global
081	182.5	60.8	Inf	45.6
082	121.7	365.0	Inf	91.2
083	91.2	91.2	60.8	26.1
084	121.7	91.2	Inf	52.1
Moyenne	121.7	96.1	243.3	44.5

3.4.4. Nombre de jours depuis le dernier entretien correctif par composant-équipement

155 événements

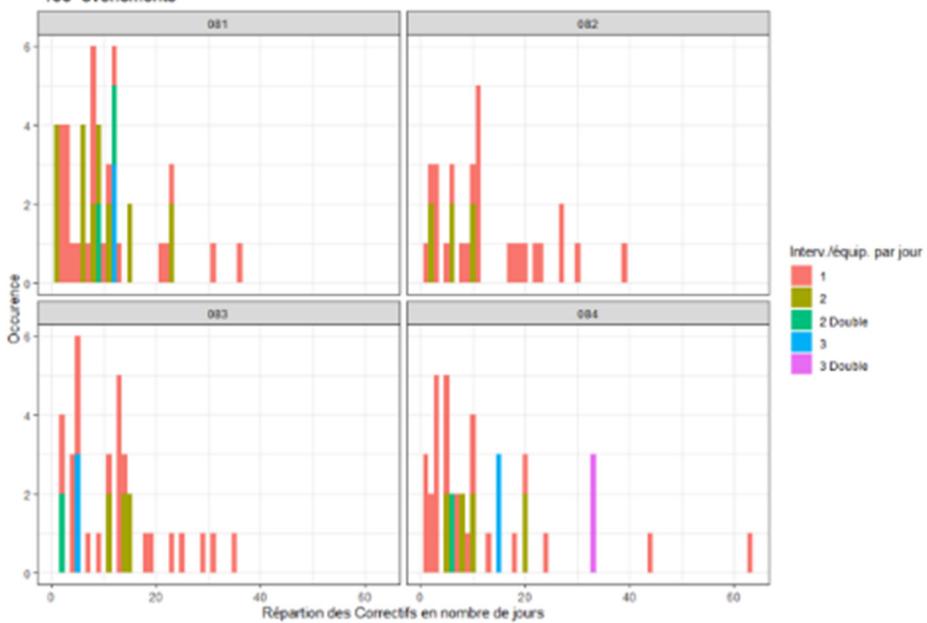
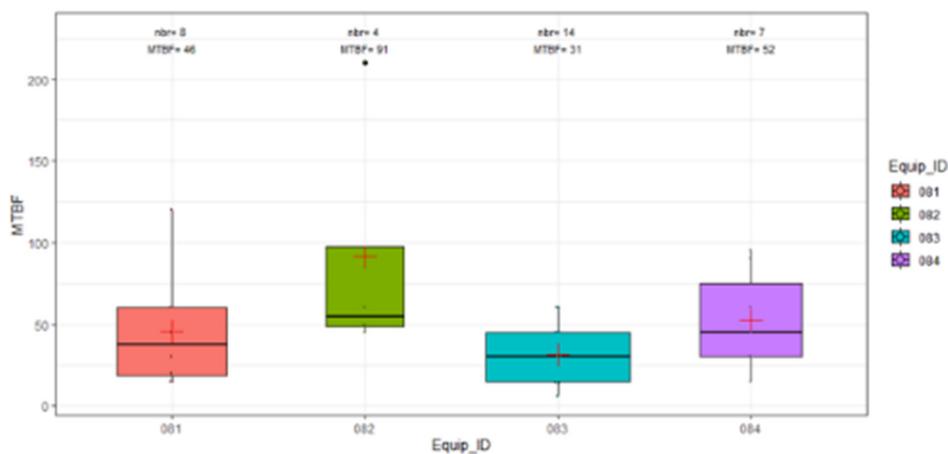
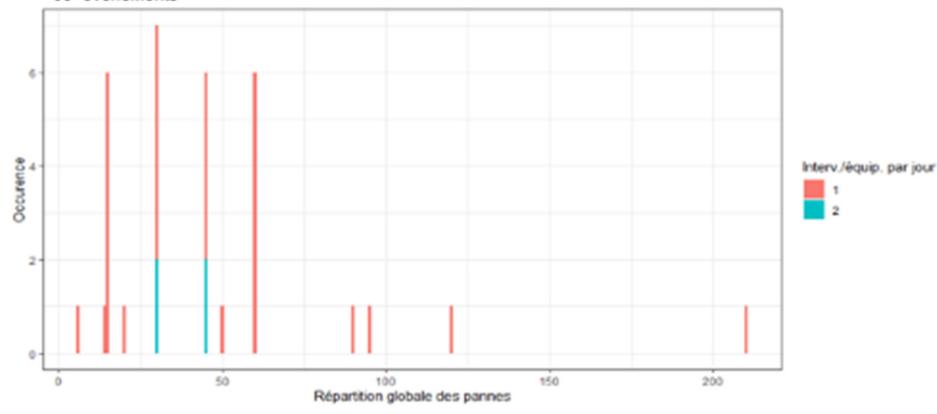


Figure 6.6 Exemple d'historique d'entretien curatif

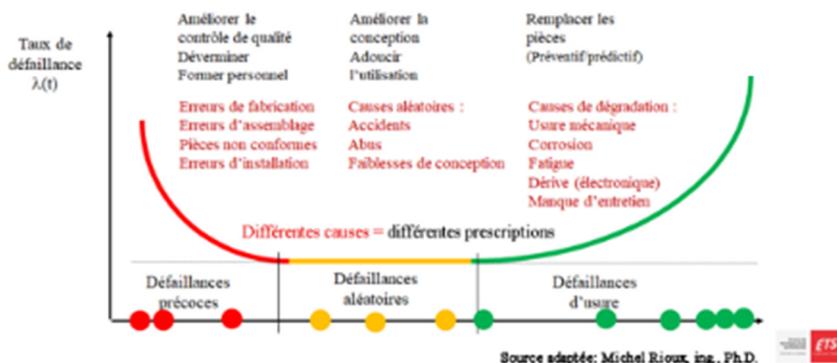
3.5.5. Nombre de jours depuis le dernier entretien curatif (tous)

33 événements



3.5.6. Distribution typique des pannes

Taux de défaillance typique



On retrouve, en annexe, le tableau des entretiens réalisés à moins de 20% du temps moyen entre les curatifs.

Figure 6.7 Exemple d'historique d'entretien curatif (suite)

6.3.3 Statistiques de maintenance

Les statistiques de maintenance permettent de dégager une vue globale du système évalué et de cibler les points d'amélioration. Selon le concept du 20/80 (20% des interventions totalisent 80% des coûts, les interventions d'optimisation les plus efficaces sont souvent dans cette région.

Les statistiques portent sur :

- Les coûts globaux de maintenance, ils peuvent inclure la main-d'œuvre maintenance, les pièces et les coûts d'arrêts de production ;
- Le nombre d'interventions ;
- La distribution des interventions détaillée par équipement des types d'interventions et des composants.

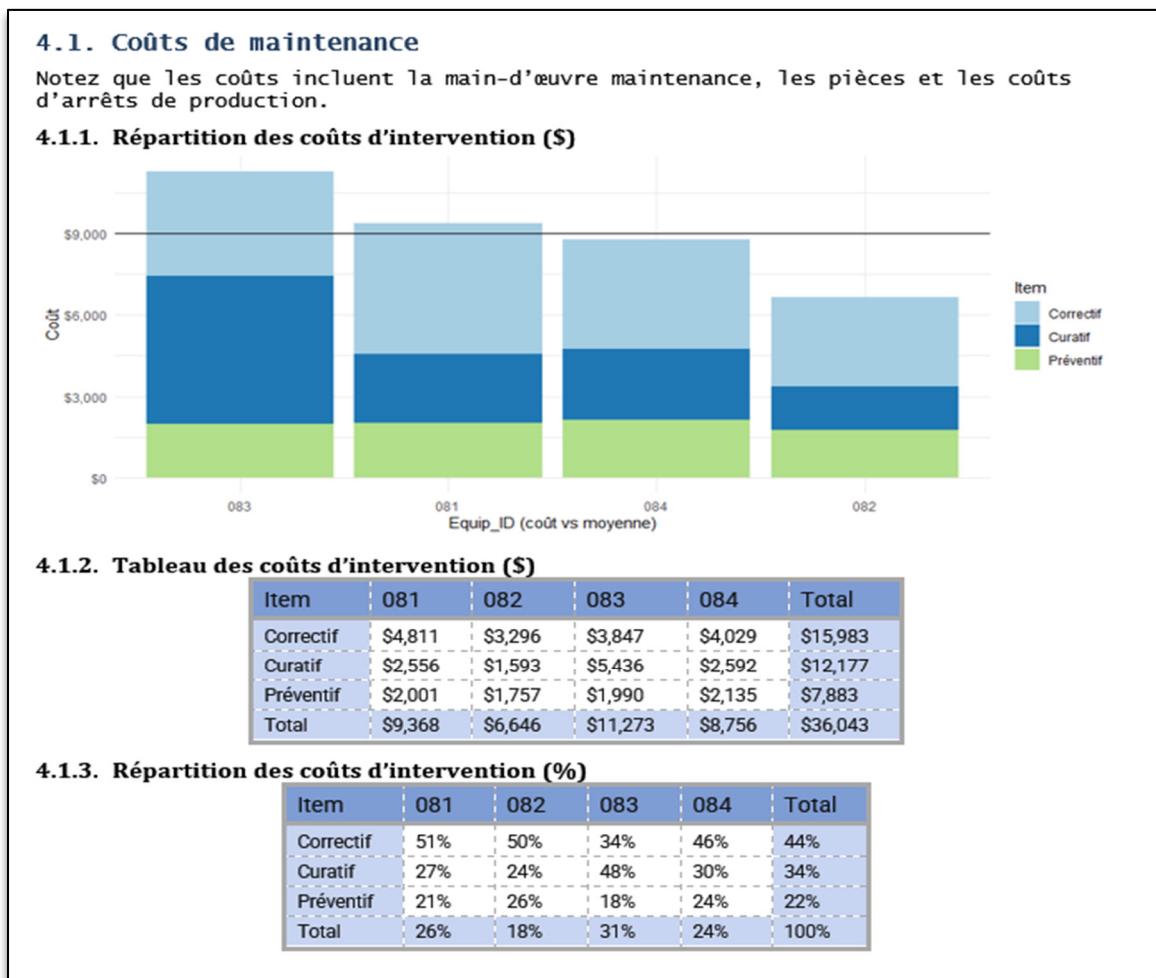
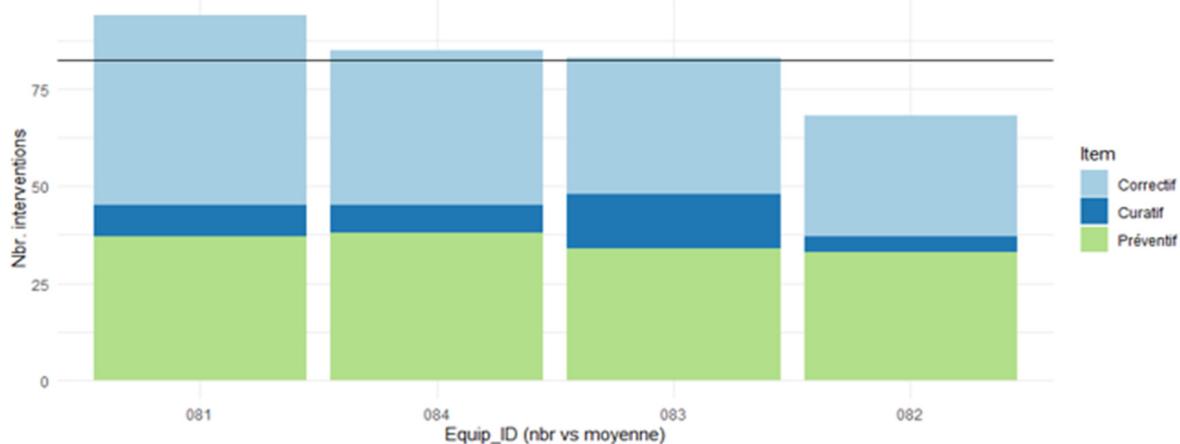


Figure 6.8 Exemple de statistique de coût de maintenance

4.2. Répartition du nombre d'interventions



4.2.1. Tableau du nombre d'interventions (Nbr)

Item	081	082	083	084	Total
Correctif	49	31	35	40	155
Curatif	8	4	14	7	33
Préventif	37	33	34	38	142
Total	94	68	83	85	330

4.2.2. Répartition des types d'interventions (%)

Item	081	082	083	084	Total
Correctif	52%	46%	42%	47%	47%
Curatif	9%	6%	17%	8%	10%
Préventif	39%	49%	41%	45%	43%
Total	10%	20%	25%	25%	100%

Objectifs de répartition des types de maintenance

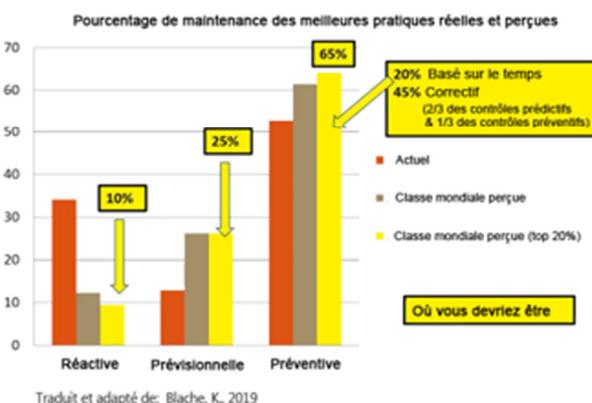


Figure 6.9 Exemple de répartition du nombre d'interventions

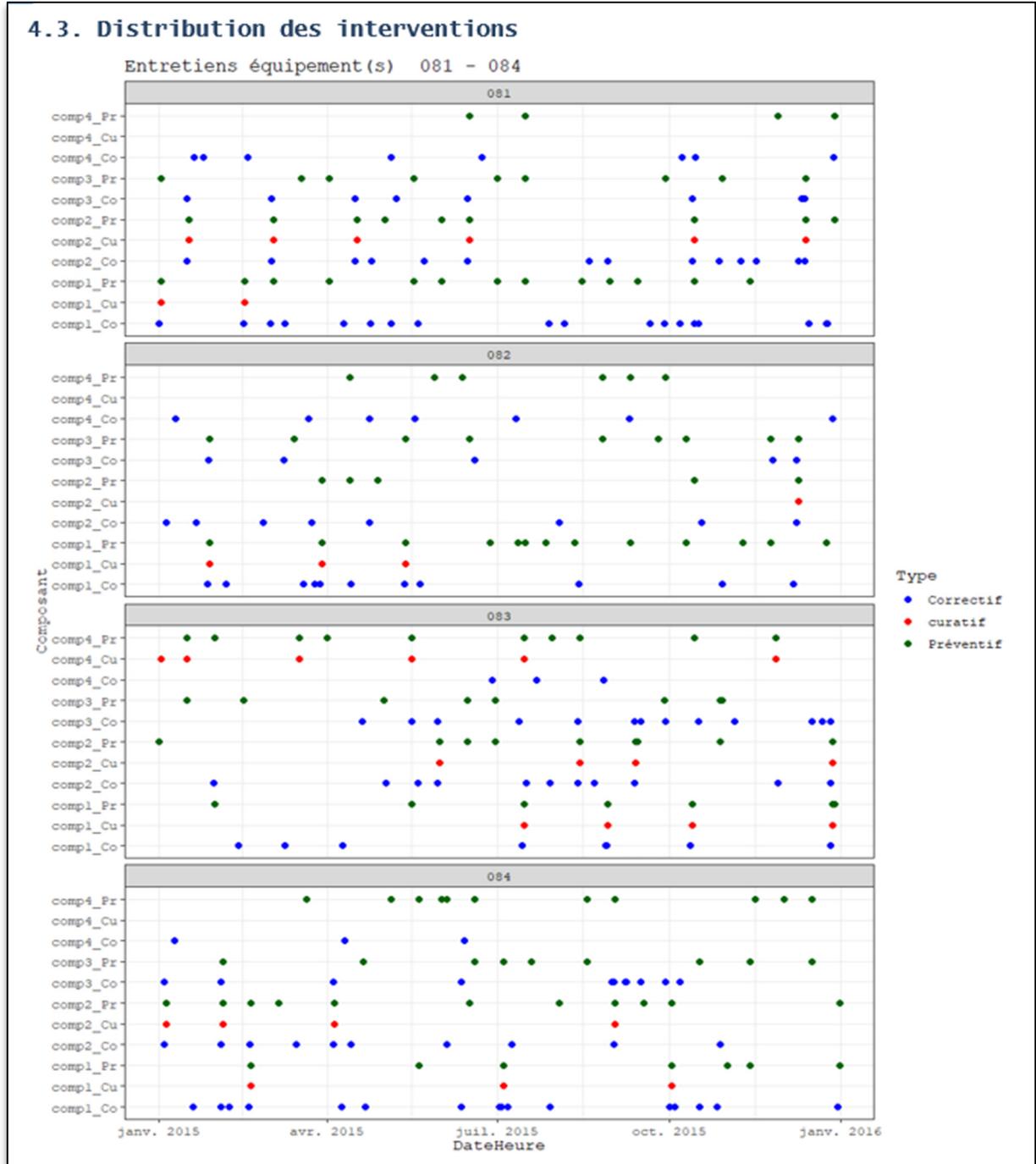


Figure 6.10 Distribution des interventions par types d'interventions et composants

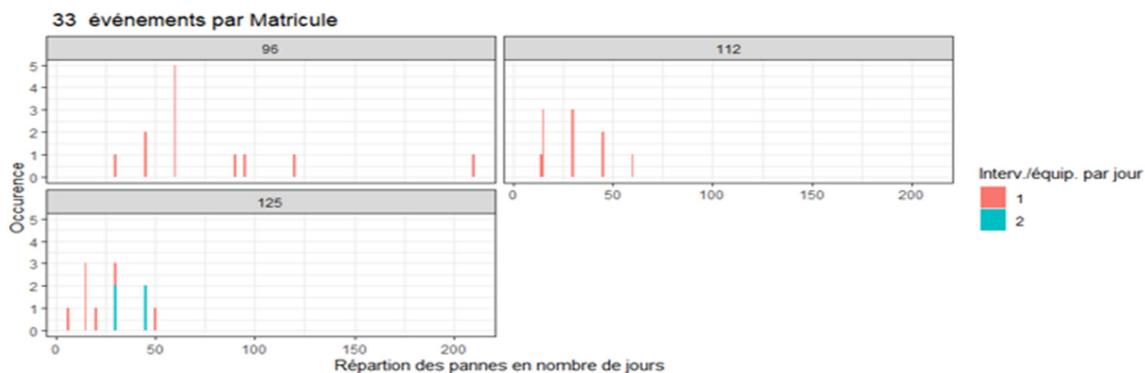
Notons que des analyses ne sont pas exhaustives, on pourrait, par exemple, y ajouter le temps moyen de réparation (MTTR).

La seconde partie des statistiques de maintenance porte sur l'évolution de points particuliers en fonction des besoins de l'équipe de maintenance, par exemple :

- Impact sur la fiabilité par employé qui permet d'évaluer la performance des intervenants de maintenance sur la fiabilité. En cas de différence significative, il y aurait lieu de voir s'il y a des besoins en formation ou si les procédures d'intervention doivent être révisées ;
- Impact sur la fiabilité par composant qui permet d'évaluer la performance de chacun des composants maintenus ;
- Impact sur la fiabilité par trimestre qui permet d'évaluer s'il y a des tendances en fonction du temps ;
- Impact en fonction de conditions d'opération météorologiques.

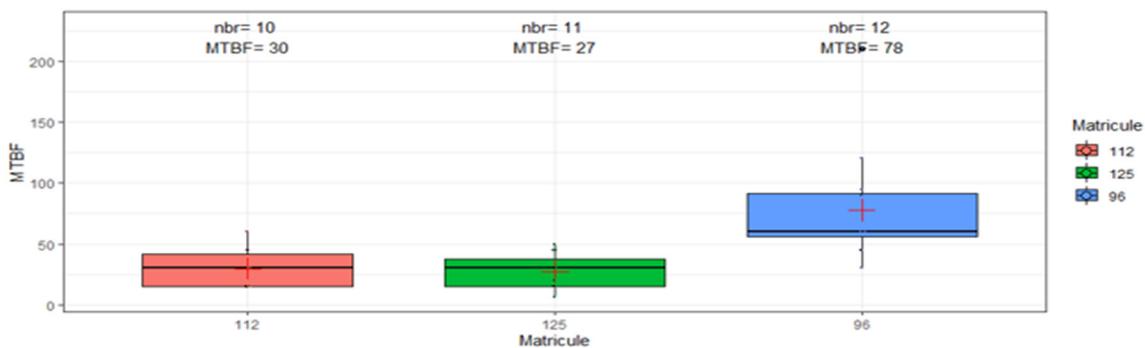
4.4. Impact sur la fiabilité: Matricule

Ce chapitre vise à vérifier s'il y a une différence dans le TBF en fonction des intervenants.



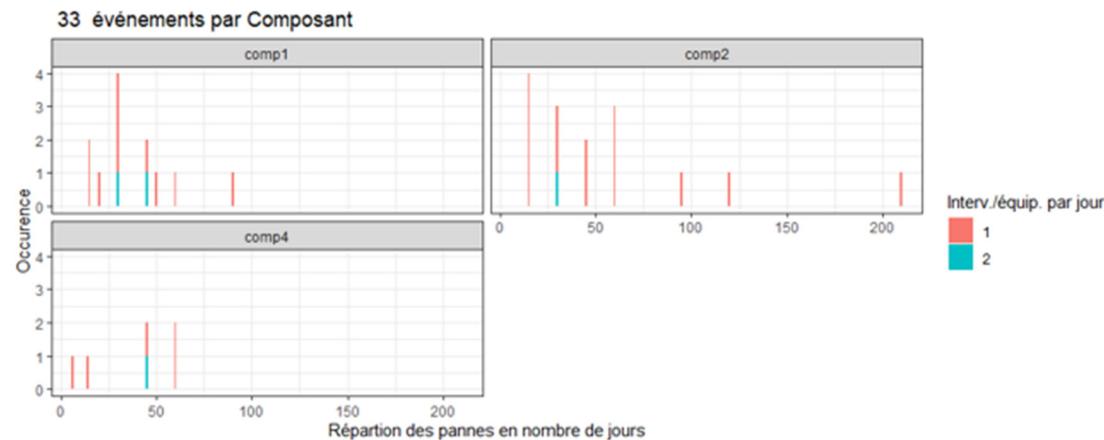
La colonne 'Prob_moy_diff' donne la probabilité que la moyenne réelle de la variable X soit différente de la variable Y compte tenu des observations (test ANOVA).

X	X_moy	X_n	X_sd	Y	Y_moy	Y_n	Y_sd	dif_XY	Prob_moy_diff
112	29.9	10	15.9	125	27.4	11	14.6	2.5	29.3 %
112	29.9	10	15.9	96	77.9	12	48.4	-48.0	99.3 %
125	27.4	11	14.6	96	77.9	12	48.4	-50.5	99.7 %



4.5. Impact sur la fiabilité: Composant

Ce chapitre vise à vérifier s'il y a une différence dans le TBF en fonction des composants.



La colonne 'Prob_moy_diff' donne la probabilité que la moyenne réelle de la variable X soit différente de la variable Y compte tenu des observations (test ANOVA).

X	X_moy	X_n	X_sd	Y	Y_moy	Y_n	Y_sd	dif_XY	Prob_moy_diff
comp1	38.3	12	21.5	comp2	56.3	15	52.4	-18	72.5 %
comp1	38.3	12	21.5	comp4	38.3	6	23.1	0	0 %
comp2	56.3	15	52.4	comp4	38.3	6	23.1	18	56.7 %

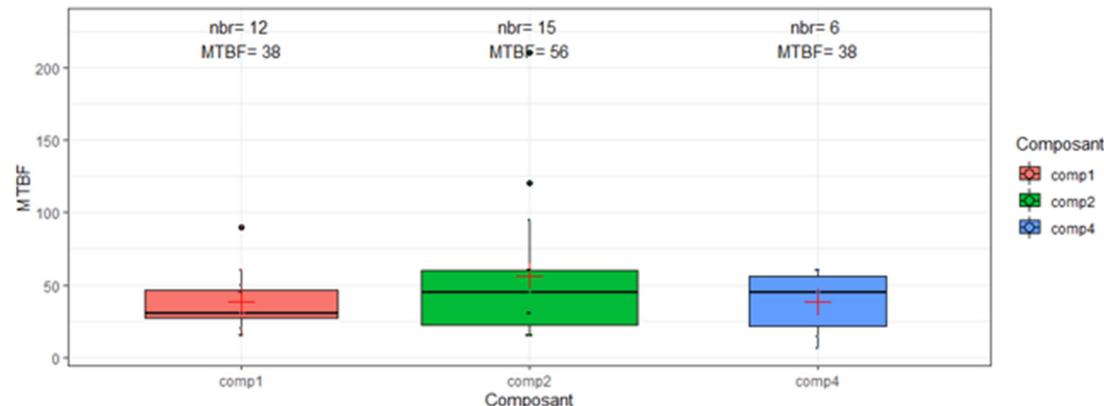
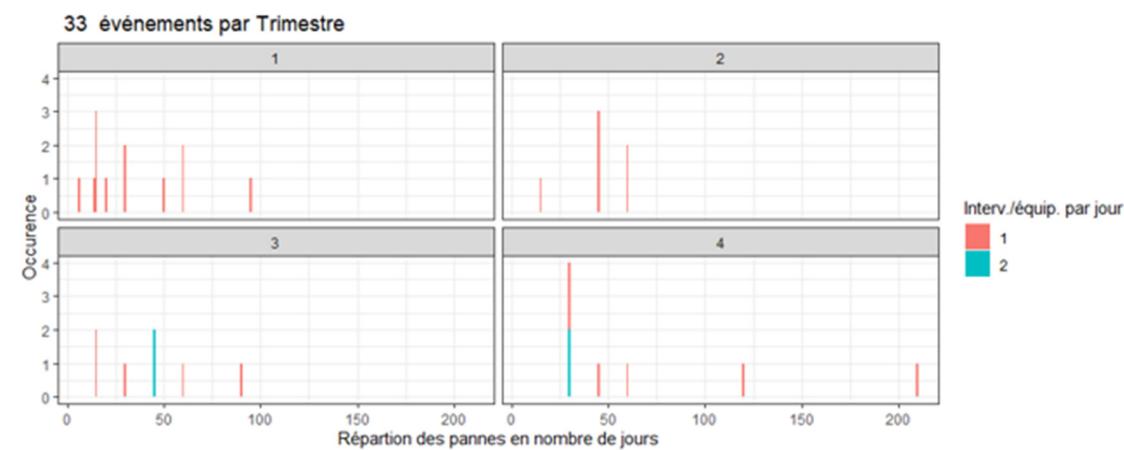


Figure 6.12 Exemple d'impact sur la fiabilité par composant

4.6. Impact sur la fiabilité: Trimestre

Ce chapitre vise à vérifier s'il y a une différence dans le TBF en fonction du trimestre.



La colonne 'Prob_moy_diff' donne la probabilité que la moyenne réelle de la variable X soit différente de la variable Y compte tenu des observations (test ANOVA).

X	X_moy	X_n	X_sd	Y	Y_moy	Y_n	Y_sd	dif_XY	Prob_moy_diff
1	34.2	12	26.7	2	45.0	6	16.4	-10.8	62.1 %
1	34.2	12	26.7	3	42.9	7	26.6	-8.7	49.8 %
1	34.2	12	26.7	4	69.4	8	64.6	-35.2	89.4 %
2	45.0	6	16.4	3	42.9	7	26.6	2.1	13.3 %
2	45.0	6	16.4	4	69.4	8	64.6	-24.4	61.1 %
3	42.9	7	26.6	4	69.4	8	64.6	-26.5	66.9 %

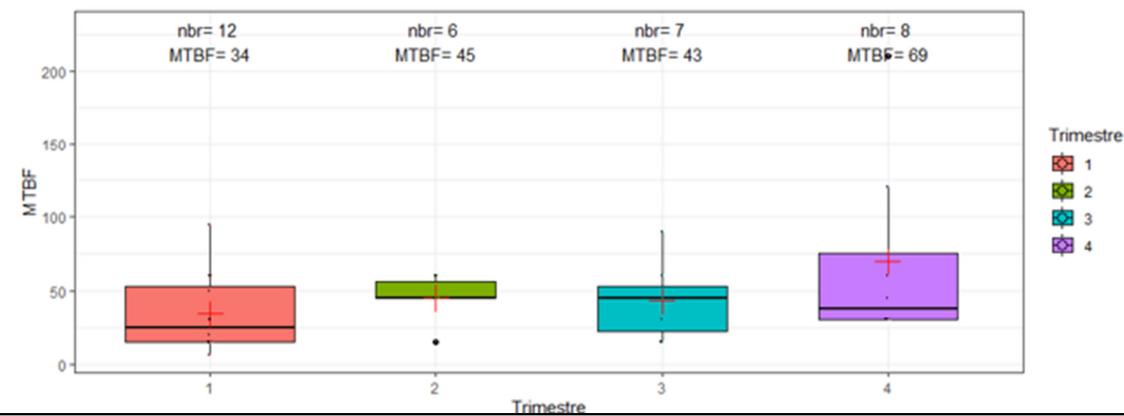


Figure 6.13 Exemple d'impact sur la fiabilité par trimestre

La dernière série de graphiques porte sur les capteurs. On y retrouve la lecture, la moyenne, la tendance et les écarts à la moyenne (2σ et 3σ). Selon Krishnamoorthi (2019), ces informations peuvent être utiles pour étalonner les préalertes (2σ soit probabilité de 97.72 % qu'il y ait quelque chose qui ne soit pas dans la normale) et les alertes (3σ soit probabilité de 99.86 % qu'il y ait quelque chose qui ne soit pas dans la normale) d'après les données fournies par les capteurs. Notons cependant que d'autres modes d'étalonnage d'alertes sont disponibles, par exemple x points au-dessus d'un niveau donné.

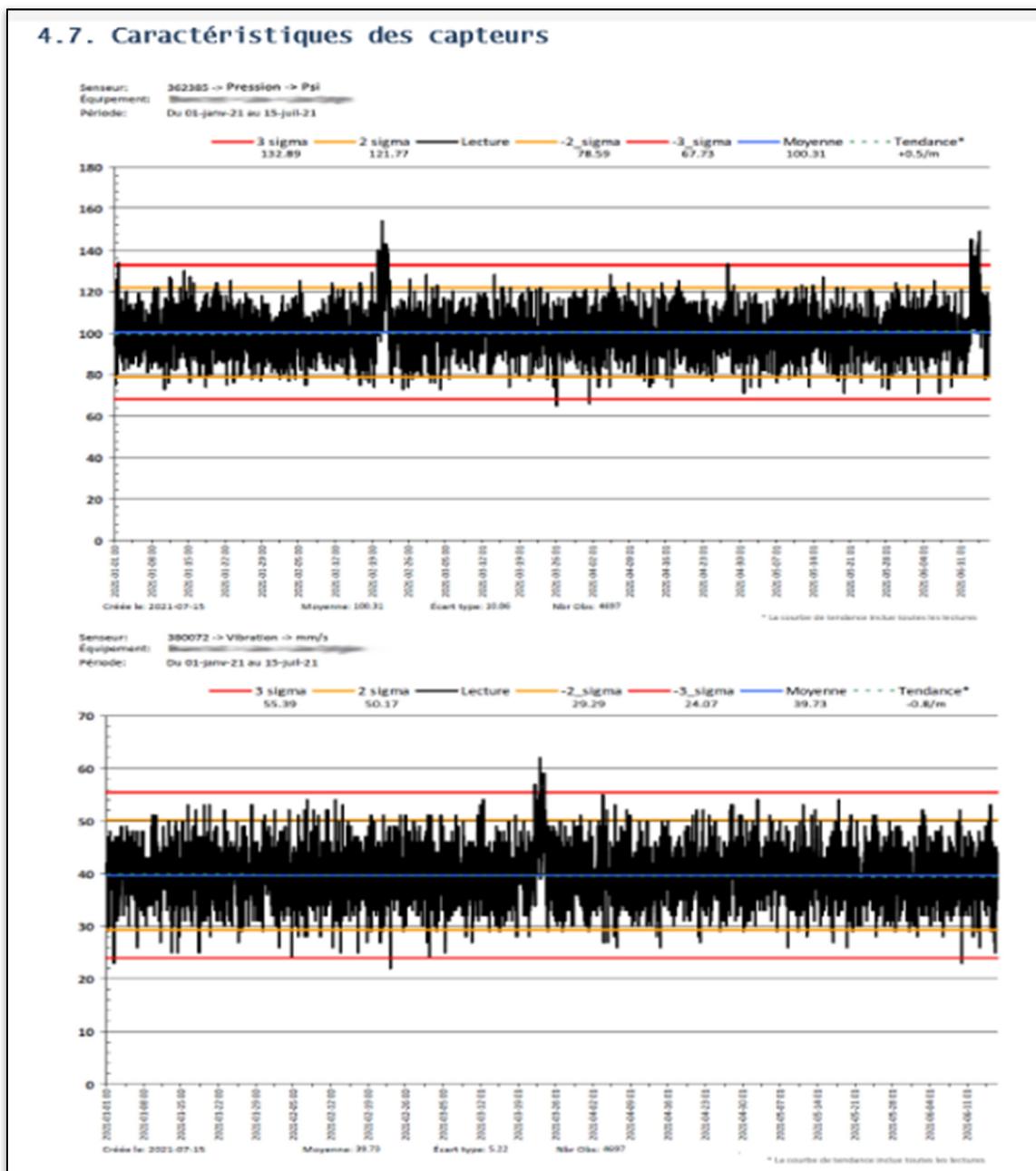


Figure 6.14 Exemple de caractérisation des capteurs

6.3.4 Maintenance prévisionnelle

Cette partie du rapport permet de prévoir pour chaque équipement la classe de durée de vie probable avant une panne.

No	Classe	Durée_vie_probable
1	000~004	0-4 jours
2	005~014	5-14 jours
3	015~029	15-29 jours
4	030~044	30-44 jours
5	045~059	45-59 jours
6	060~089	60-89 jours
7	090~119	90-119 jours
8	120+	120 jours et +

Tableau 6.1 Exemple de classe de durée de vie des équipements

Pour ce faire, on normalise et combine et les sources de données dans un tableau (voir annexe I, Exemple de tableau d'entraînement pour modèle prévisionnel). Puis on divise ce tableau en deux groupes ; les premiers 80 % sont utilisés pour entraîner le modèle de prévision, le second groupe est utilisé pour tester le modèle.

5. Apprentissage machine

5.1. Préparation des données

Cette étape consiste à réunir les différentes sources de données afin de créer des fonctionnalités décrivant le mieux la condition d'un équipement à un moment donné.

Les données de télémétrie viennent presque toujours avec des horodatages, ce qui les rend idéales pour le calcul des caractéristiques. Une méthode courante consiste à choisir une taille de fenêtre pour les caractéristiques de décalage à créer et à calculer des mesures globales mobiles telles que la moyenne, l'écart type, le minimum, le maximum, etc. afin de représenter l'historique à court terme de la télémétrie sur la fenêtre de décalage. Nous utiliserons la moyenne mobile et l'écart type des données aux 3 heures et aux 24 heures.

Nombre de lignes incomplètes exclues: 1105 (9%)

5.2. Classe de vie résiduelle

Les 80 premiers % des données seront utilisés pour entraîner le modèle.

Les 20 derniers % des données seront utilisés pour tester le modèle.

Les variables utilisées pour l'analyse sont:

ClasVieResid ~ Equip_ID + Modele + age + volt_moy + temp_moy + pression_moy + vibration_moy + volt_sd + temp_sd + pression_sd + vibration_sd + volt_max + temp_max + pression_max + vibration_max + Since_comp1_Co + Since_comp2_Co + Since_comp3_Co + Since_comp4_Co + Since_comp1_Pr + Since_comp2_Pr + Since_comp3_Pr + Since_comp4_Pr + Since_comp1_Cu + Since_comp2_Cu + Since_comp4_Cu + Matricule + Trimestre + Date

Définitions des variables des senseurs

<i>_moy</i>	Moyenne sur la période de regroupement
<i>_sd</i>	Déviation standard sur la période de regroupement
<i>_max</i>	Maximum du senseur sur la période de regroupement
<i>_min</i>	minimum du senseur sur la période de regroupement
<i>Since_Co_</i>	Période depuis la dernière faute (correctif)
<i>Since_Pr_</i>	Période depuis le dernier entretien préventif
<i>Since_Cu_</i>	Période depuis la dernière panne (curatif)
<i>Date</i>	Date/heure du regroupement

Figure 6.16 Exemple de préparation des données pour l'apprentissage machine

Ce type de prévision se prête bien à un apprentissage supervisé. Selon Peterson (2021), « l'apprentissage supervisé est une approche de création d'intelligence artificielle (IA), où un algorithme informatique est formé sur des données d'entrée qui ont été étiquetées pour une sortie particulière. Le modèle est entraîné jusqu'à ce qu'il puisse détecter les modèles et les relations sous-jacents entre les données d'entrée et les étiquettes de sortie, ce qui lui permet de produire des résultats d'étiquetage précis lorsqu'il est présenté avec des données inédites. »

L'apprentissage supervisé est bon pour les problèmes de classification et de régression, tels que déterminer à quelle catégorie appartient un article de presse ou prédire le volume des ventes pour une date future donnée. Dans l'apprentissage supervisé, l'objectif est de donner un sens aux données dans le contexte d'une question spécifique. »

Selon Upasana (2021), il existe principalement quatre grandes classes d'algorithme en apprentissage machine supervisé, soit les régressions linéaires, les arbres de décision, les forêts aléatoires et les classifications plus proches voisins. Pour le rapport, un modèle prévisionnel de chaque classe a été retenu.

Par la suite, on entraîne, avec le premier groupe de 80 % des données, les quatre modèles prévisionnels utilisés, soit le modèle de régression linéaire (RLG), la forêt aléatoire (RF), l'arbre de décision (CART) et le K plus proche voisin (KNN). Notons que, en fonction de la situation et des résultats, d'autres modèles, tels que les réseaux de neurones, pourraient être ajoutés.

L'étape suivante est de quantifier la précision de la prévision. Pour ce faire, on applique les modèles entraînés sur le second groupe de données, dont on connaît les résultats, pour calculer l'exactitude des prévisions par rapport à la réalité observée.

Finalement, le programme utilise l'information la plus récente sur l'état de chaque équipement et applique les modèles de prévision afin d'évaluer leurs classes de vie résiduelle. On retrouve dans le tableau de l'annexe I un exemple de tableau d'entraînement. La première colonne donne l'heure et la date de l'enregistrement. La dernière colonne donne la classe de vie résiduelle observée. Les colonnes du centre donnent les valeurs des caractéristiques suivies.

Indicateurs de mesure des résultats

Selon Shmueli, B. (2019), pour évaluer la performance de chacun des modèles multiclassé, deux types de mesures sont principalement utilisées, la précision et le rappel. Pour mieux comprendre, un exemple de prévision multiclassé où N=3 sera utilisé. 25 photos (chien, chat, oiseau) ont été présentées pour reconnaissance à un classificateur.

		Vrai (Observé)		
		Chat	Chien	Oiseau
Prédiction	Chat	4	6	3
	Chien	1	2	0
	Oiseau	1	2	6

Tableau 6.2 Matrice prédition-observé

Quatre situations peuvent se produire :

Vrai positif (VP) : L'observé est vrai et la prédition est vraie

Vrai négatif (VN) : L'observé est faux et la prédition est fausse

Faux positif (FP) : L'observé est faux et la prédition est vraie

Faux négatif (FN) : L'observé est vrai et la prédition est fausse

La **précision** pour la classe Chat est le nombre de photos de chat correctement prédites (4) sur toutes les photos de chat prédites (4+3+6=13), soit $4/13=30,8\%$. La précision globale micro est la moyenne des précisions soit $(4/13+2/3+6/9)/3 = 54\%$.

$$\text{Précision}_i = \frac{\text{Vrai positif}_i}{\text{Vrai positif}_i + \text{Faux négatif}_i}$$

$$\text{Précision multi classe} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{précision}_i}{n}$$

Le **rappel** pour la classe Chat est le nombre de photos de chats faussement prédictes (2) sur le nombre de photos de chats prédicts (4 +1 +1=6), soit $4/6=66,7\%$. Cela signifie que notre classificateur a classé 4/6 des photos de chats comme étant des chats. Le rappel multi classe est la moyenne des rappels soit $(4/6+2/10+6/9)/3 = 51\%$

$$\text{Rappel}_i = \frac{\text{Vrai négatif } i}{\text{Vrai négatif } i + \text{Faux positif } i}$$

$$\text{Rappel multiclasse} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{rappel}_i}{n}$$

Précision adjacente

Dans un environnement de maintenance, il est beaucoup plus intéressant d'avoir une prévision un peu trop en avance (ex. 005~014 jours) pour une panne (ex. 015~029 jours) qu'une prévision en retard (ex. 030~044 jours). Rappelons qu'une prévision en retard pourrait causer une panne pouvant affecter la production. Pour qualifier la précision, on utilisera donc la notion de précision adjacente, c'est-à-dire que la prévision est valable si la panne a été bien classée ou une classe en avance.

Influence relative des variables

Les prochains chapitres présentent les modèles prévisionnels utilisés. On peut voir, dans les trois premiers, des graphiques d'influence relative des variables. Ces graphiques détaillent les principales variables, fournies dans le tableau d'entraînement (annexe II), qui ont influencé leurs classifications. Par exemple, il sera intéressant de constater que le délai de l'entretien curatif du composant 2 est nettement le premier facteur d'influence pour les trois modèles. L'analyse du mode de dégradation de ce composant pourrait être porteur d'amélioration globale du système. De même, il est surprenant de constater, pour le modèle de régression linéaire, que le seul paramètre physique ayant une influence significative pour les trois est la tension ; a-t-on les bons capteurs ? Sont-ils bien placés ?

6.3.5 Modèles prévisionnels

Modèle : régression linéaire

Selon la documentation de Microsoft-Azur (2021), la régression linéaire tente d'établir une relation linéaire entre une ou plusieurs variables indépendantes et un résultat numérique, ou variable dépendante. La régression linéaire est un bon choix lorsque l'on veut un modèle simple pour une tâche prévisionnelle de base. La régression linéaire a également tendance à bien fonctionner sur des ensembles de données éparses et de grandes dimensions sans complexité.

La matrice de confusion permet de voir la relation entre les classes de durée de vie prévue et les classes de durées de vie réelles.

5.3. Régression linéaire (RLG)								
5.3.1. Matrice de confusion (réel vs prédict)								
Reel_Predic	000~004	005~014	015~029	030~044	045~059	060~089	090~119	120+
000~004	165	27	25	1	0	0	0	0
005~014	9	96	31	0	0	0	0	0
015~029	20	80	144	7	0	0	0	0
030~044	3	74	118	100	0	0	0	0
045~059	23	160	121	1	0	0	0	0
060~089	30	81	244	126	120	72	0	0
090~119	2	0	0	113	120	4	0	0
120+	0	0	0	0	0	0	0	0

		Précision
		Adjacent

Statistiques de prédiction

Nombre d'équipements: 4

Nombre d'entretiens curatif: 33

Nombre d'observations: 2117

Précision: 27.26 %

Précision adjacente: 46.01 %

Précision-macro: 54.21 %

Sensibilité: 32.64 %

Rappel: 0.33

F1: 0.26

Figure 6.17 Exemple de résultat de régression linéaire

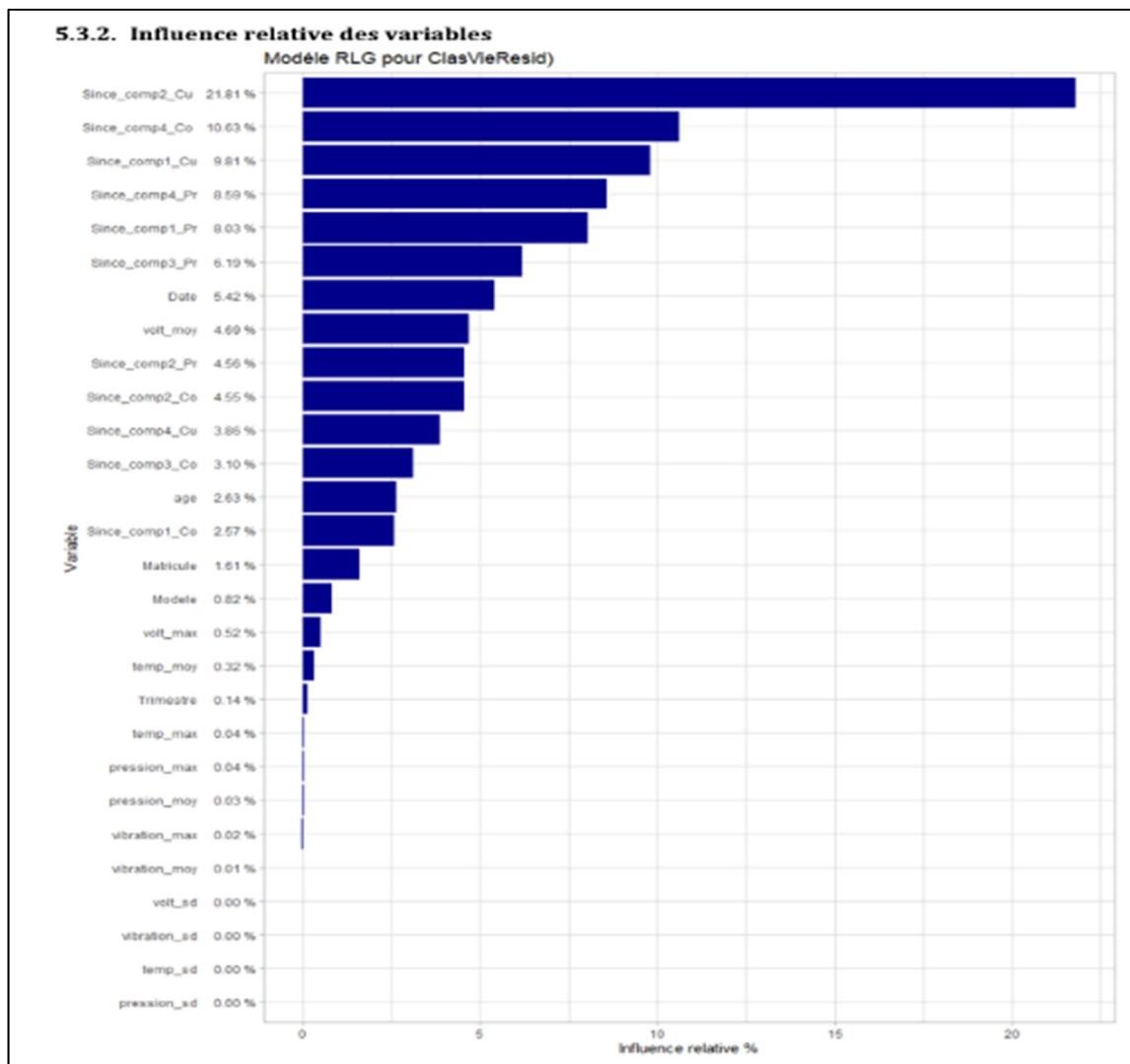


Figure 6.18 Exemple d'influence relative sur un modèle de régression linéaire

À la figure 6.18, on constate que, pour ce modèle, la période depuis le dernier entretien curatif du composant 2 influence 22 % des résultats du modèle et est la variable qui a le plus d'influence sur celui-ci.

Modèle : arbre de décision

Selon la documentation de Microsoft-Azur (2021), les arbres de décision sont des modèles non paramétriques qui effectuent une séquence de tests simples pour chaque instance, traversant une structure de données d'arbre binaire jusqu'à ce qu'une décision soit atteinte.

Les arbres de décision présentent les avantages suivants :

- Ils sont efficents à la fois sur le plan du calcul et de l'utilisation de la mémoire pendant l'entraînement et la prévision ;
- Ils peuvent représenter des limites de décision non linéaires ;
- Ils effectuent une sélection et une classification intégrées des caractéristiques et résistent à la présence de caractéristiques bruyantes.

Ce modèle de régression est constitué d'un ensemble d'arbres de décision. Chaque arbre d'une forêt de décision de régression génère une distribution gaussienne en tant que prévision. Une agrégation est effectuée sur l'ensemble des arbres pour trouver une distribution gaussienne la plus proche de la distribution combinée pour tous les arbres du modèle.

5.5. Decision Trees (CART)								
Reel_Predic	000~004	005~014	015~029	030~044	045~059	060~089	090~119	120+
000~004	139	3	22	3	0	0	0	0
005~014	31	114	68	0	0	0	0	0
015~029	0	1	111	0	0	0	0	0
030~044	0	1	118	100	0	0	0	0
045~059	9	82	233	7	0	0	0	0
060~089	55	238	130	120	120	72	0	0
090~119	18	79	1	118	120	4	0	0
120+	0	0	0	0	0	0	0	0

XX	Précision
XX	Adjacent

5.5.2. Statistiques de prédition

Nombre d'équipements: 4
 Nombre d'entretien curatif: 33
 Nombre d'observations: 2117
 Précision: 25.32 %
 Précision adjacente: 41.95 %
 Précision-macro: 53.73 %
 Sensibilité: 30.99 %
 Rappel: 0.31
 F1: 0.26

Figure 6.19 Exemple de résultat d'arbre de décision

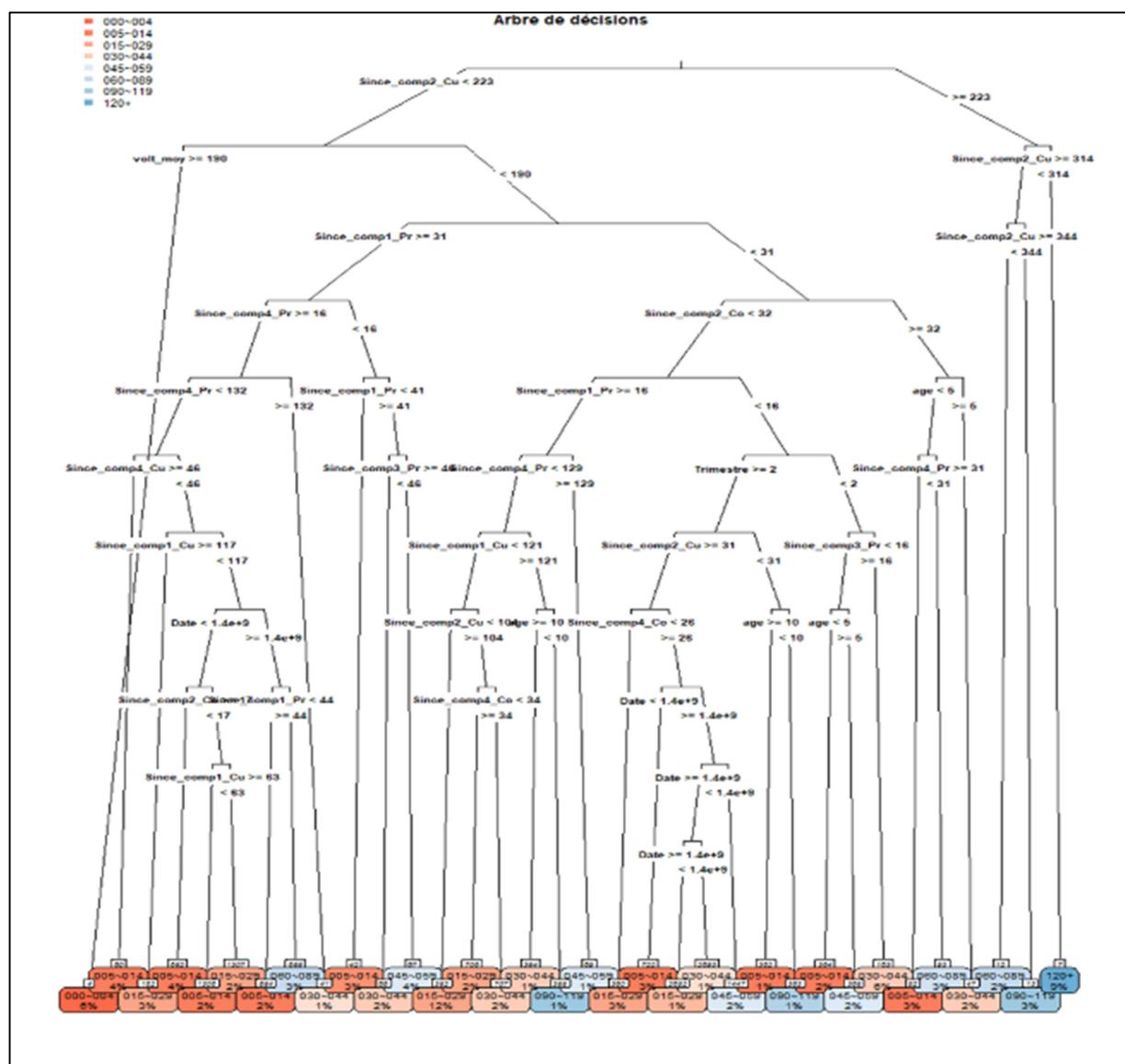


Figure 6.20 Exemple d'influence relative des variables sur un modèle d'arbre de décision

À la figure 6.20, on constate que, pour ce modèle, la période depuis du dernier entretien curatif du composant 2 est la première branche de l'arbre donc celle qui a le plus d'influence sur le modèle.

Modèle : Forêt aléatoire

Selon Yiu, T. (2019), la forêt aléatoire, comme son nom l'indique, se compose d'un grand nombre d'arbres décisionnels individuels qui fonctionnent comme un ensemble. Chaque arbre individuel de la forêt aléatoire émet une prévision de classe et la classe ayant reçu le plus de votes devient la prévision de notre modèle.

Le concept fondamental de la forêt aléatoire est simple, mais puissant : la sagacité des foules. Sur le plan de la science des données, la raison pour laquelle le modèle de forêt aléatoire fonctionne si bien est la suivante :

La faible corrélation entre les arbres est la clé. Tout comme en Finance où les investissements faiblement corrélés se regroupent pour former un portefeuille qui est plus grand que la somme de ses parties, les modèles non corrélés peuvent produire des prévisions d'ensemble qui sont plus précises que toutes les prévisions individuelles. Cet effet s'explique par le fait que les arbres se protègent mutuellement de leurs erreurs individuelles (tant qu'ils ne se trompent pas tous constamment dans la même direction). Si certains arbres peuvent se tromper, de nombreux autres arbres auront raison, de sorte qu'en tant que groupe, les arbres sont capables d'évoluer dans la bonne direction.

5.4. Random Forest (RF)								
5.4.1. Matrice de confusion (réel vs prédit)								
Reel_Predic	000~004	005~014	015~029	030~044	045~059	060~089	090~119	120+
000~004	170	156	24	1	0	0	0	0
005~014	10	37	47	38	2	0	0	0
015~029	17	75	265	85	93	3	0	0
030~044	0	3	1	95	14	0	0	0
045~059	7	85	104	1	11	1	0	0
060~089	29	159	219	109	120	72	0	0
090~119	19	2	23	19	0	0	0	0
120+	0	1	0	0	0	0	0	0

Précision

Adjacent

5.4.2. Statistiques de prédiction	
Nombre d'équipements:	4
Nombre d'entretiens curatif:	33
Nombre d'observations:	2117
Précision:	30.7 %
Précision adjacente:	54.79 %
Précision-macro:	54.46 %
Sensibilité:	34.29 %
Rappel:	0.34
F1:	0.25

Figure 6.21 Exemple de résultat de forêt aléatoire

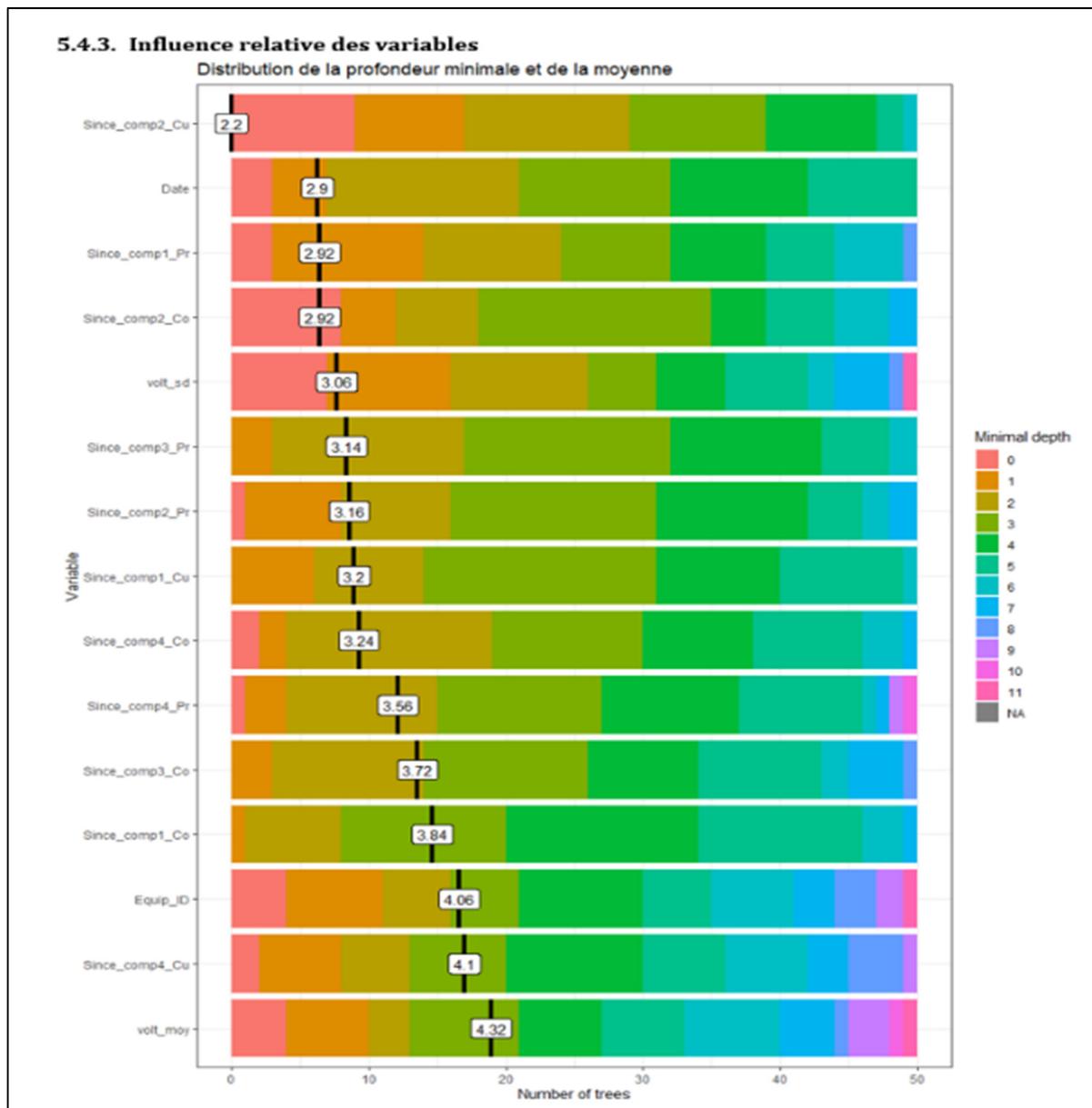


Figure 6.23 Exemple d'influence relative des variables sur un modèle de forêt aléatoire

À la figure 6.23, on constate que, pour ce modèle, la période depuis du dernier entretien curatif du composant 2 est la première variable qui influence sur le modèle.

En conclusion, étant donné que les trois modèles fournissant un graphique des influences relatives des variables indiquent que la période depuis le dernier entretien curatif du composant 2, il est probable que l'amélioration de celle-ci ait un impact direct sur la durée de vie des équipements. Il serait intéressant de pousser l'analyse sur composant 2.

Modèle : K plus proche voisin (KNN)

Selon Subramanian, D. (2019), KNN est un algorithme simple qui stocke tous les cas disponibles et classe les nouvelles données ou les nouveaux cas sur la base d'une mesure de similarité. Il est surtout utilisé pour classer un point de données en fonction de la façon dont ses voisins sont classés.

Dans KNN, « k » est un paramètre qui fait référence au nombre de voisins les plus proches à inclure dans la majorité du processus de vote.

Par exemple, si nous ajoutons un nouveau verre de vin dans l'ensemble de données. Nous aimerais savoir si le nouveau vin est rouge ou blanc. Nous devons donc déterminer quels sont les voisins dans ce cas. Posons que $k = 5$ et que le nouveau point de données est classé par la majorité des votes de ses cinq voisins et le nouveau point serait classé comme rouge puisque quatre de ses cinq voisins sont rouges.

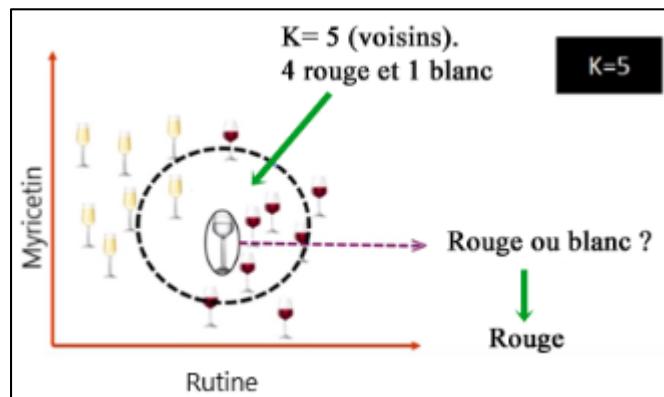


Figure 6.24 Classement KNN

En général, dans la pratique, le choix de la valeur de k est la racine carrée de N où N représente le nombre d'échantillons de l'ensemble de données d'entraînement.

5.6. K plus proches voisins (KNN)								
5.6.1. Matrice de confusion (réel vs prédit)								
Reel_Predic	000~004	005~014	015~029	030~044	045~059	060~089	090~119	120+
000~004	29	25	30	0	20	16	0	0
005~014	35	52	32	2	0	56	0	0
015~029	13	80	28	0	0	0	0	0
030~044	151	320	512	345	216	4	0	0
045~059	8	23	6	0	4	0	0	0
060~089	2	0	28	0	0	0	0	0
090~119	14	18	39	1	0	0	0	0
120+	0	0	8	0	0	0	0	0

XX	Précision
XX	Adjacent

11.5.2 Statistiques de prédiction

Nombre d'équipements: 4

Nombre d'entretiens curatif: 33

Nombre d'observations: 2117

Précision: 21.63 %

Précision adjacente: 64.15 %

Précision-macro: 45.41 %

Sensibilité: 18.06 %

Rappel: 0.18

F1: 0.11

Figure 6.25 Exemple de résultat de KNN

Modèle : Pondéré

Un dernier modèle de prévision est créé. Le modèle pondéré qui utilise le concept développé pour la forêt aléatoire, soit la sagacité des foules, mais du point de vue combiné des 4 modèles. Pour ce faire, on calcule la moyenne entière des quatre premières prévisions pondérées par la précision adjacente de celles-ci. Soit :

$$\text{Moyenne pondérée} = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^4 \text{Moyenne classe}(i) * \text{précision adjacente}(i)}{\sum_{i=1}^4 \text{précision adjacente}(i)} \right) \right]$$

Équation de la moyenne pondérée

5.7.1. Matrice de confusion (réel vs prédict)								
Reel_Predic	000~004	005~014	015~029	030~044	045~059	060~089	090~119	120+
000~004	48	3	0	0	0	0	0	0
005~014	108	114	41	1	0	0	0	0
015~029	20	6	172	0	0	0	0	0
030~044	26	188	134	108	20	16	0	0
045~059	28	186	276	220	205	59	0	0
060~089	22	21	60	19	15	1	0	0
090~119	0	0	0	0	0	0	0	0
120+	0	0	0	0	0	0	0	0

XX
XX

Précision
Adjacent

5.7.2. Statistiques de prédition

Nombre d'équipements: 4

Nombre d'entretiens curatif: 33

Nombre d'observations: 2117

Précision: 30.61 %

Précision adjacente: 59.23 %

Précision-macro: 50.23 %

Sensibilité: 26.27 %

Rappel: 0.26

F1: 0.23

Figure 6.26 Exemple de résultat de KNN

Sélection du modèle prévisionnel

Le modèle prévisionnel choisi est celui qui a la plus grande précision adjacente, dans ce cas le modèle K plus proche voisin (KNN) même s'il y est dernier en termes de précision.

Tableau 6.3 Tableau des prévisions

Equip	Date	RLG	RF	CART	KNN	Pondéré
	Précision	27.3 %	30.7 %	25.3 %	21.6 %	30.6 %
	Préc. adjacente	46 %	54.8 %	41.9 %	64.1 %	59.2 %
081	2016/01/01	090~119	060~089	045~059	030~044	060~089
082	2016/01/01	015~029	015~029	005~014	030~044	015~029
083	2016/01/01	030~044	015~029	005~014	030~044	015~029
084	2016/01/01	030~044	060~089	030~044	030~044	045~059

6.3.6 Tableau des interventions à moins 20 % du MTBF

L'annexe 1 fournit les tableaux des interventions réalisés à moins de 20 % du MTBF pour ce type d'intervention. En se basant sur le principe de Pareto, le suivi et l'analyse du déroulement de ces interventions pourrait offrir un bon potentiel d'amélioration du MTBF global. Par exemple, en focalisant les efforts d'amélioration sur la composante 2.

6.4 Conclusion

Le sixième chapitre propose un outil pour soutenir la démarche de maintenance 4.0. Si l'on exclut l'arriéré des travaux et le MTBF, les équipes soucieuses de l'amélioration de la maintenance disposent rarement d'outils structurants pour les soutenir. Le rapport prévisionnel (RP) vise à combler ce manque.

Bien que son aspect pourrait, à première vue, être perçu comme austère ou complexe, le RP est un puissant outil d'amélioration des performances pour les groupes maintenances. Une fois pris en main, le RP permet d'avoir une meilleure compréhension de la fonction maintenance, une prévision des défaillances et un suivi de l'historique. Une des prémisses de ce rapport est

qu'il n'y a pas deux environnements de maintenance identiques, conséquemment le RP a été conçu afin de s'adapter facilement aux diverses réalités et à l'évolution des besoins.

CONCLUSION

La maintenance industrielle vise à conserver le potentiel des équipements pour assurer la continuité et la qualité de la production ou la livraison de service. Elle représente en moyenne 20 % des frais d'exploitation d'une industrie et les défaillances d'équipement, à la suite d'une mauvaise maintenance, peuvent avoir des conséquences majeures pour l'entreprise. Elle comprend des interventions (dépannage, nettoyage, graissage, inspection, réparations, améliorations, etc.) réalisées dans le cadre de politiques de maintenance, soit réactives (curatives ou palliatives), préventives (systématiques ou conditionnelles) et prévisionnelles (souvent nommée 4.0).

La maintenance prévisionnelle implique, principalement, le suivi de paramètres physiques des équipements ou son environnement, les interventions faites sur ceux-ci et de l'historique de dégradation. En plus de fournir l'état des équipements en temps quasi réel, ces informations permettent de créer un modèle prévisionnel permettant d'équilibrer les interventions de maintenance dans le but d'optimiser l'utilisation des équipements au cours de sa durée de vie et minimiser les temps d'arrêt imprévus.

Selon Schleichert, Olaf & all. (2017), un programme de maintenance 4.0 devrait avoir comme impact :

- Réduction des coûts d'exploitation et des dépenses de matériel : 5 % à 10 %
- Augmentation du temps de fonctionnement et de la disponibilité des équipements : 10 % à 20 %
- Réduction des coûts globaux de maintenance : 5 % à 10 %
- Réduction du temps consacré à la planification de la maintenance : 20 % à 50 %.

Bien que prometteuse et attirant l'intérêt, la démarche de maintenance 4.0 reçoit un accueil mitigé des entreprises. Seulement 20 % de celles-ci s'attendent à mettre en œuvre des solutions

à grande échelle d'ici 2022. Elles affirment que l'adoption de solutions IIoT pose de nombreux défis tant du point de vue des ressources humaines, des risques financiers ou de la technologie.

Une enquête de Cisco qui signale que 60 % des initiatives IoT stagnent au stade de la preuve de concept et que seulement 26 % des entreprises ont eu une initiative IoT qu'elles considéraient comme un succès complet. Une des principales conclusions du rapport est l'importance du facteur humain :

L'IoT et la maintenance 4.0 peuvent sembler être une question de technologie, mais les facteurs humains tels que la culture, l'organisation et le leadership sont essentiels au succès du projet.

L'implantation d'un mode de maintenance 4.0 peut facilement être perçue comme une rupture technologique entraînant un sentiment de perte de contrôle ou de dévalorisation de leurs travaux par le personnel technique et les gestionnaires de maintenance. On ne peut pas tenir pour acquis que cette nouvelle technologie et son mode d'implantation seront acceptés par les équipes de maintenance.

Compte tenu de l'importance du facteur humain lors d'une implantation de maintenance 4.0, il serait intéressant de pouvoir tester cet aspect lors du choix de la technologie et de son approche d'implantation. Pour se faire, Venkatesh, V. & All. (2000) propose un modèle d'acceptation de la technologie, le TAM2. Le modèle a été testé sur une implantation technologique impliquant 500 employés de maintenance répartie en 12 corps de métier. On conclut que le modèle s'applique bien dans un environnement de maintenance et peut être utilisé comme indicateur, préalable à une implantation maintenance 4.0, pour en évaluer la probabilité de succès et/ou les points à améliorer.

98 % des entreprises québécoises ont moins de 100 employés. Pour eux, l'implantation d'une maintenance prévisionnelle peut sembler difficile sinon impossible bien que présentant un grand intérêt.

Un des objectifs de ce mémoire est de proposer une démarche d'implantation de maintenance 4.0 adaptée aux PME. Pour en définir les paramètres, on utilise les principaux défis à l'implantation pour en faire des contraintes à la conception. Puis, on élabore des critères de conceptions qui les adressent.

La démarche proposée se réalise en mode Agile. Elle permet à l'équipe de maintenance d'évoluer et d'ajuster sa démarche pour bien répondre aux particularités de l'entreprise. Elle tend compte de la maturité de maintenance, des particularités de production, de la culture et de la dynamique d'équipe. De plus, elle supporte un développement progressif et de laisse une possibilité de retrait ou de pause à l'implantation, ce qui implique moins de risque pour l'entreprise.

On utilise le concept de produit minimum viable afin de minimiser les défis. Il permet de débuter avec un petit groupe d'équipement et un minimum de ressources humaines et financières impliquées. À chaque étape, on obtient des livrables opérationnels. Le rythme de la démarche s'adapte à chaque entreprise. On peut se rendre compte directement de l'intérêt, des impacts et des opportunités de la démarche au fur et à mesure. L'équipe apprend et s'ajuste.

La démarche facilite, en limitant les besoins en ressources financières et humaines, l'introduction de la maintenance 4.0 à un rythme qui respecte le milieu, tant du point de vue de l'acquisition de nouvelles compétences que pour l'exploration des applications possibles. Le recourt à un professionnel est souhaitable pour accompagner la démarche.

Le suivi des paramètres physiques se fait via un service de capteurs IIoT (SaaS). Outre le vaste choix de capteurs, cette approche minimise les compétences technologiques nécessaires à la conception des capteurs, de leurs calibrations, des interfaces et des infrastructures. De plus, elle diminue les délais de mise en service. Bien qu'un logiciel d'intégration ait été développé dans le cadre de ce mémoire, la démarche et les concepts ne sont pas limités par celui-ci. La solution pourrait s'appliquer aussi bien sur ordinateur qu'en infonuagique.

La démarche proposée peut avoir un impact significatif sur la connaissance des équipements et leurs comportements. Elle permet de soutenir la chaîne de valeur de connaissance (CVC) et peut devenir un avantage stratégique pour l'entreprise. Le rapport prévisionnel permet de mieux comprendre l'état actuel des équipements et suivre l'évolution du système. Son analyse automatisée, réalisée en langage R, devra être adaptée à l'environnement et évoluer en fonction des besoins.

I Notons qu'il est recommandé, lors des premières implantations, d'avoir recourt à un facilitateur maîtrisant la démarche pour encadrer celle-ci. Cependant, un des objectifs est l'autonomie du personnel de maintenance pour la démarche. Le facilitateur deviendra progressivement un conseiller ad hoc au besoin pour l'équipe.

Bien que le recours à un système de traitement monoposte en facilite son introduction, il présente des limitations particulièrement en ce qui touche les possibilités d'intégration avec les logiciels d'entreprises et des ressources de calculs.

Le système proposé est bien adapté dans plusieurs situations dont ;

- Petites et moyennes entreprises par son aspect entré de gamme
- Services de maintenance externalisés pour son suivi des équipements hors site.
- Projet pilote de maintenance 4.0, afin de tester l'introduction d'un système plus complexe et intégré.
- Soutien à la démarche de résolution de problèmes en permettant rapidement un suivi des équipements.

À PROPOS DE L'AUTEUR

Diplômé de l'École Polytechnique de Montréal en génie industriel, orientation informatique (1984), l'auteur a été ingénieur principal maintenance aux équipements fixes du Métro de Montréal pendant 30 ans. Durant cette période, il a complété un certificat en intervention psychosociale (dynamique d'équipe) à l'UQAM.

En 2008, il est nommé ingénieur senior, responsable technique maintenance pour un projet de renouvellement du système de gestion de la maintenance (GMAO : SAP-PM). Ce projet de 4 M\$ impliquait 500 employés et 4 G\$ d'actif. L'auteur y a été confronté avec la difficulté de répondre, avec un lourd système corporatif, aux besoins spécifiques et évolutifs de la maintenance de 30 systèmes impliquant 12 corps de métier principalement au niveau du maintien de la fiabilité.

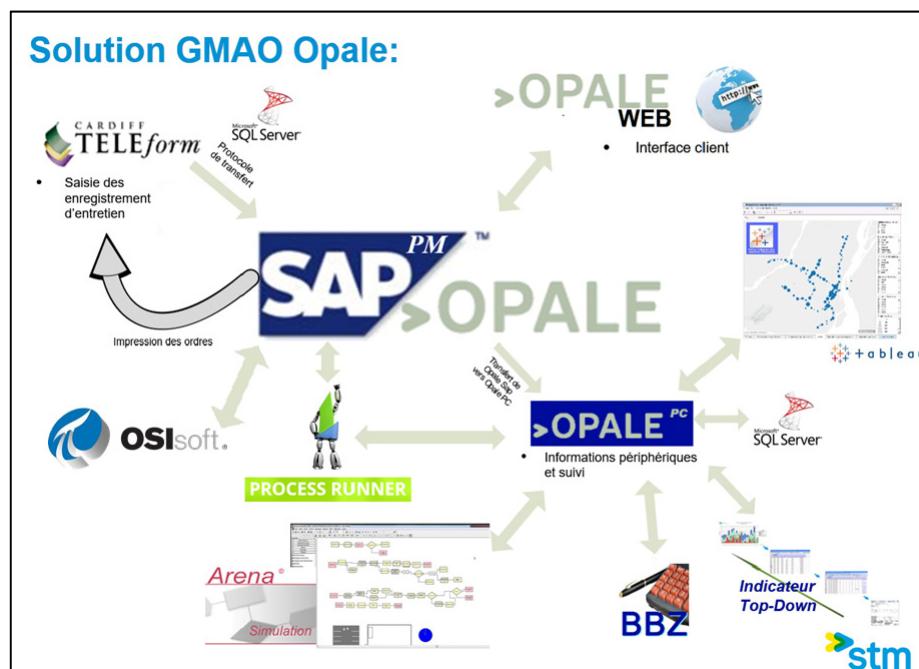


Figure 6.27 Solution GMAO Opale
Tiré de Vadeboncoeur R. (2016)

Il a conçu la solution ***Opale*** ^{PC} qui sert d'intégrateur et de base commune, non supportée par SAP-PM, pour les intervenants de maintenance. Elle a permis de baisser le temps de répondre aux besoins de modules opérationnels de trois mois à trois semaines avec moins de ressources. Ainsi, l'équipe de soutien pouvait répondre rapidement aux besoins spécifiques opérationnels. Cependant, l'aspect analytique (4.0) faisait défaut dans la solution tant pour l'optimisation des ressources que pour l'amélioration de la fiabilité.

En 2018, l'auteur a rejoint l'équipe du professeur M. Michel Rioux, ing. (ÉTS), dans le cadre d'un projet de maîtrise, afin de développer une solution d'entrée de gamme permettant de faciliter l'introduction de la maintenance 4.0 en entreprise.

ANNEXE I

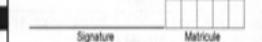
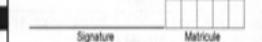
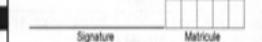
TABLEAU D'ENTRAINEMENT DU MODÈLE PRÉVISIONNEL

Tableau – A I-1 Tableau d’entraînement du modèle prévisionnel

ANNEXE II

EXEMPLE DE FORMULAIRE DE RETOUR TECHNIQUE

Figure – A II-1 Exemple de formulaire de retour technique

 Inspection mensuelle CNIM Ordre de préventif Opération 0010 - Inspection 1 des Escaliers CNIM Poste Ent. Insp. 1 des Esc. CNIM 20 L100372 (72216) 1 mois EM-GEN-GEN Escaliers mécaniques et tapis roulants Inspection 1 des Escaliers CNIM Procédures de référence: Métier Poste Technique F2552-CM0114-EM EM - Bonaventure - Quai V2 O. à Mezz. Lieu + Local Station Bonaventure Ch. mdc. sup. qual Montmorency V2 E. Resp / Loc CTM Escal. Lionel-Groulx Jr EM-Ber-56-1546 (3) & 2552 N° ID technique EMGENGEN-L100372 EM CN20 L100372 Bonaventure descente Point kilométrique	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">Historique</td> <td style="width: 10%;">Désignation</td> <td style="width: 10%;">Date</td> <td style="width: 10%;">Clôturé</td> <td style="width: 10%;">Symptôme/Objet</td> <td style="width: 10%;">Type</td> </tr> <tr> <td>40101041</td> <td>Insp. 3 des Esc. CNIM 20 L100372 (72216)</td> <td>21.04.2013</td> <td></td> <td>À réparer</td> <td>FP-OT</td> </tr> <tr> <td>31465264</td> <td>Panneaux latéraux SU GA DR</td> <td>04.04.2013</td> <td></td> <td>À réparer</td> <td>FR-OT</td> </tr> <tr> <td>31452098</td> <td>ACHAT GESMAT</td> <td>02.10.2012</td> <td></td> <td>Autre</td> <td>FR-OT</td> </tr> <tr> <td>40097699</td> <td>Insp. 1 des Esc. CNIM 20 L100372 (72216)</td> <td>17.03.2013</td> <td>04.04.2013</td> <td>À réparer</td> <td>FP-OT</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Effectué (temps mis sur intervention)</td> </tr> <tr> <td>30060708</td> <td>Blocage</td> <td>28.03.2013</td> <td>02.04.2013</td> <td>Blocage</td> <td>FD-OT</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Effectué (temps mis sur intervention)</td> </tr> <tr> <td>31463249</td> <td>Panneaux latéraux IN GA</td> <td>07.03.2013</td> <td>14.03.2013</td> <td>À réparer</td> <td>FR-OT</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Effectué (temps mis sur intervention)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Date de réalisation</td> <td colspan="4">Exécutant</td> </tr> <tr> <td colspan="2">  88 mm 11 </td> <td colspan="4">  </td> </tr> <tr> <td colspan="2">Avancement</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <input type="radio"/> Non débuté <input type="radio"/> En cours <input type="radio"/> Complété </td> <td colspan="2">  Temps de travail 4 4 3 2 1 10 20 30 </td> <td colspan="2">  Déplacement 4 4 3 2 1 10 20 30 </td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">  Préparation 4 4 3 2 1 10 20 30 </td> <td colspan="2">  Attente 4 4 3 2 1 10 20 30 </td> </tr> <tr> <td colspan="2">Contremaitre</td> <td colspan="4">  Maitrise Disponibilité hors opér. </td> </tr> <tr> <td colspan="2">Signature</td> <td colspan="4"> Feuille: EM00375084Q  Confirmation: 0006355698  </td> </tr> </table>	Historique	Désignation	Date	Clôturé	Symptôme/Objet	Type	40101041	Insp. 3 des Esc. CNIM 20 L100372 (72216)	21.04.2013		À réparer	FP-OT	31465264	Panneaux latéraux SU GA DR	04.04.2013		À réparer	FR-OT	31452098	ACHAT GESMAT	02.10.2012		Autre	FR-OT	40097699	Insp. 1 des Esc. CNIM 20 L100372 (72216)	17.03.2013	04.04.2013	À réparer	FP-OT	Effectué (temps mis sur intervention)						30060708	Blocage	28.03.2013	02.04.2013	Blocage	FD-OT	Effectué (temps mis sur intervention)						31463249	Panneaux latéraux IN GA	07.03.2013	14.03.2013	À réparer	FR-OT	Effectué (temps mis sur intervention)						Date de réalisation		Exécutant				 88 mm 11						Avancement						<input type="radio"/> Non débuté <input type="radio"/> En cours <input type="radio"/> Complété		 Temps de travail 4 4 3 2 1 10 20 30		 Déplacement 4 4 3 2 1 10 20 30				 Préparation 4 4 3 2 1 10 20 30		 Attente 4 4 3 2 1 10 20 30		Contremaitre		 Maitrise Disponibilité hors opér.				Signature		Feuille: EM00375084Q  Confirmation: 0006355698 				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="width: 10%;">Spécifications</th> <th colspan="3" style="width: 80%;">Escalier hors service</th> <th rowspan="2" style="width: 10%; text-align: right;">Intervalle</th> </tr> <tr> <th style="width: 30%;">Vérifié</th> <th style="width: 30%;">3 à réparer</th> <th style="width: 30%;">7 à changer</th> <th style="width: 10%;">31 à effectuer</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Habilage et plaque (EMHAB)</td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Plaque identif. PIE</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Manquante ou endommagée 7</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Pictogramme PIC</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Manquante ou endommagée 7</td> <td><input type="radio"/> 000</td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Balustrade BLU</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Jeu, retrait, sallie > 3mm 3, jeu > 6mm ou coupant 3 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Cabochon CBC</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Cintrage de roue de M/C, jeu > 10 mm 3 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Moulure MOU</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Endommagée, jeu entre panneau > 3 mm 3, jeu > 5 mm ou coupant 3 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Panneau latéral PLT</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Jeu entre panneau > 3mm 3, jeu >5mm ou coupant 3 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Plinthe PLU</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Endommagé 3 ou 7, jeu avec marche = 0 mm 3 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Brosse plinthe BRP</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> CNIM2: Jeu avec marche > 4 mm 1 côté ou 2 cotés > 7mm 3 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Plaque peigne PPG</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> CNIM1: Jeu avec marche > 5 mm 1 côté ou 2 cotés > 6mm 3 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Peigne PEI</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> 50% usé, pas enregre, 2 dents de suite brisées</td> <td><input type="radio"/> 000</td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Trappe caisson TRC</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> 2 dents brisées/peigne, 1 dent brisée adjacente à 1 nervure usée 7 imm.</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Marche (EMMAR)</td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Marche MRC</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Dommage structural 7 immédiat, 1 nervure brisée > 25mm long 3, débris 31</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Cogne dans peigne, jeu entre marche à plat > 6mm</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Cogne dans peigne, jeu entre marche à plat > 6mm</td> <td><input type="radio"/> 3 immédiat. 000</td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Pas d'engrènement avec levée 3 immédiat, jeu avec marche < 4mm OU > 6mm 3</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Marche MRC</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> 50% usé, pas enregre, 2 dents de suite brisées</td> <td><input type="radio"/> 000</td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Marche MRC</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> 2 dents brisées/peigne, 1 dent brisée adjacente à 1 nervure usée 7 imm.</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Main courante (EMMCO)</td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Main courante MCR</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Endommagée, jeu > 10mm, traction, écart de vitesse > 1 marche 3 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Brosse d'entrée BRE</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Lâche ou endommagée 7, brisée ou jeu > 10 mm 7 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Contrôle (EMCON)</td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Arrêt balustrade TAB</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Coincé ou non-fonctionnel 3 immédiat, brisé 7 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Porte PCO</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Mal austé ou lâche 3, brisé 7 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Opercule OPE</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Brisé ou manquant 7 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Ronfleur SNI</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Non-fonctionnel 3, brisé 7</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Frein de service IFS</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Distance arrêt < 1/3 marche (137mm) OU > 1.1 marches (450mm) 3 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Voyant arrêt nor. VNO</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Brûlé ou endommagé 7, sale 31</td> <td><input type="radio"/> Logé <input type="radio"/> Escalier</td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Voyant blocage VBL</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Brûlé ou endommagé 7, sale 31</td> <td><input type="radio"/> Logé <input type="radio"/> Escalier</td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Sélecteur à clef SEL</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Coincé ou non-fonctionnel 3, brisé 7 immédiat</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Interr. peigne ILM</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> CNIM1: Mécanisme non-fonctionnel (levée, recul) 3 immédiat, sale 31</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Interr. plinthe IPL</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> CNIM2: Mécanisme non-fonctionnel 3 immédiat, sale 31</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Fluorescent FLU</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Non-fonctionnel 7, sale 31</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td><input type="radio"/> Interr. entrée M/C IEM</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/> Non-fonctionnel 7 immédiat, sale 31</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Commentaires - ajustement</td> </tr> <tr> <td colspan="5"> <input type="radio"/> Erreur d'inscription (correction en commentaire) Feuille: EM00375084Q  Mission: </td> </tr> </tbody> </table>	Spécifications	Escalier hors service			Intervalle	Vérifié	3 à réparer	7 à changer	31 à effectuer	Habilage et plaque (EMHAB)					<input type="radio"/> Plaque identif. PIE	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Manquante ou endommagée 7	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Pictogramme PIC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Manquante ou endommagée 7	<input type="radio"/> 000	<input type="radio"/> Balustrade BLU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Jeu, retrait, sallie > 3mm 3, jeu > 6mm ou coupant 3 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Cabochon CBC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Cintrage de roue de M/C, jeu > 10 mm 3 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Moulure MOU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Endommagée, jeu entre panneau > 3 mm 3, jeu > 5 mm ou coupant 3 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Panneau latéral PLT	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Jeu entre panneau > 3mm 3, jeu >5mm ou coupant 3 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Plinthe PLU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Endommagé 3 ou 7, jeu avec marche = 0 mm 3 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Brosse plinthe BRP	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> CNIM2: Jeu avec marche > 4 mm 1 côté ou 2 cotés > 7mm 3 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Plaque peigne PPG	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> CNIM1: Jeu avec marche > 5 mm 1 côté ou 2 cotés > 6mm 3 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Peigne PEI	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 50% usé, pas enregre, 2 dents de suite brisées	<input type="radio"/> 000	<input type="radio"/> Trappe caisson TRC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 2 dents brisées/peigne, 1 dent brisée adjacente à 1 nervure usée 7 imm.	<input type="radio"/>	Marche (EMMAR)					<input type="radio"/> Marche MRC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Dommage structural 7 immédiat, 1 nervure brisée > 25mm long 3, débris 31	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Cogne dans peigne, jeu entre marche à plat > 6mm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Cogne dans peigne, jeu entre marche à plat > 6mm	<input type="radio"/> 3 immédiat. 000	<input type="radio"/> Pas d'engrènement avec levée 3 immédiat, jeu avec marche < 4mm OU > 6mm 3	<input type="radio"/> Marche MRC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 50% usé, pas enregre, 2 dents de suite brisées	<input type="radio"/> 000	<input type="radio"/> Marche MRC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 2 dents brisées/peigne, 1 dent brisée adjacente à 1 nervure usée 7 imm.	<input type="radio"/>	Main courante (EMMCO)					<input type="radio"/> Main courante MCR	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Endommagée, jeu > 10mm, traction, écart de vitesse > 1 marche 3 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Brosse d'entrée BRE	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Lâche ou endommagée 7, brisée ou jeu > 10 mm 7 immédiat	<input type="radio"/>	Contrôle (EMCON)					<input type="radio"/> Arrêt balustrade TAB	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Coincé ou non-fonctionnel 3 immédiat, brisé 7 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Porte PCO	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Mal austé ou lâche 3, brisé 7 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Opercule OPE	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Brisé ou manquant 7 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Ronfleur SNI	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Non-fonctionnel 3, brisé 7	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Frein de service IFS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Distance arrêt < 1/3 marche (137mm) OU > 1.1 marches (450mm) 3 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Voyant arrêt nor. VNO	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Brûlé ou endommagé 7, sale 31	<input type="radio"/> Logé <input type="radio"/> Escalier	<input type="radio"/> Voyant blocage VBL	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Brûlé ou endommagé 7, sale 31	<input type="radio"/> Logé <input type="radio"/> Escalier	<input type="radio"/> Sélecteur à clef SEL	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Coincé ou non-fonctionnel 3, brisé 7 immédiat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Interr. peigne ILM	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> CNIM1: Mécanisme non-fonctionnel (levée, recul) 3 immédiat, sale 31	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Interr. plinthe IPL	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> CNIM2: Mécanisme non-fonctionnel 3 immédiat, sale 31	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Fluorescent FLU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Non-fonctionnel 7, sale 31	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Interr. entrée M/C IEM	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Non-fonctionnel 7 immédiat, sale 31	<input type="radio"/>	Commentaires - ajustement					<input type="radio"/> Erreur d'inscription (correction en commentaire) Feuille: EM00375084Q  Mission:								
		Historique	Désignation	Date	Clôturé	Symptôme/Objet	Type																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		40101041	Insp. 3 des Esc. CNIM 20 L100372 (72216)	21.04.2013		À réparer	FP-OT																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		31465264	Panneaux latéraux SU GA DR	04.04.2013		À réparer	FR-OT																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		31452098	ACHAT GESMAT	02.10.2012		Autre	FR-OT																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		40097699	Insp. 1 des Esc. CNIM 20 L100372 (72216)	17.03.2013	04.04.2013	À réparer	FP-OT																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		Effectué (temps mis sur intervention)																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		30060708	Blocage	28.03.2013	02.04.2013	Blocage	FD-OT																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		Effectué (temps mis sur intervention)																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		31463249	Panneaux latéraux IN GA	07.03.2013	14.03.2013	À réparer	FR-OT																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Effectué (temps mis sur intervention)																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Date de réalisation		Exécutant																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
 88 mm 11																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Avancement																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
<input type="radio"/> Non débuté <input type="radio"/> En cours <input type="radio"/> Complété		 Temps de travail 4 4 3 2 1 10 20 30		 Déplacement 4 4 3 2 1 10 20 30																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		 Préparation 4 4 3 2 1 10 20 30		 Attente 4 4 3 2 1 10 20 30																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Contremaitre		 Maitrise Disponibilité hors opér.																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Signature		Feuille: EM00375084Q  Confirmation: 0006355698 																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Spécifications	Escalier hors service			Intervalle																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	Vérifié	3 à réparer	7 à changer		31 à effectuer																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Habilage et plaque (EMHAB)																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
<input type="radio"/> Plaque identif. PIE	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Manquante ou endommagée 7	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Pictogramme PIC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Manquante ou endommagée 7	<input type="radio"/> 000																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Balustrade BLU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Jeu, retrait, sallie > 3mm 3, jeu > 6mm ou coupant 3 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Cabochon CBC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Cintrage de roue de M/C, jeu > 10 mm 3 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Moulure MOU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Endommagée, jeu entre panneau > 3 mm 3, jeu > 5 mm ou coupant 3 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Panneau latéral PLT	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Jeu entre panneau > 3mm 3, jeu >5mm ou coupant 3 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Plinthe PLU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Endommagé 3 ou 7, jeu avec marche = 0 mm 3 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Brosse plinthe BRP	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> CNIM2: Jeu avec marche > 4 mm 1 côté ou 2 cotés > 7mm 3 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Plaque peigne PPG	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> CNIM1: Jeu avec marche > 5 mm 1 côté ou 2 cotés > 6mm 3 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Peigne PEI	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 50% usé, pas enregre, 2 dents de suite brisées	<input type="radio"/> 000																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Trappe caisson TRC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 2 dents brisées/peigne, 1 dent brisée adjacente à 1 nervure usée 7 imm.	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Marche (EMMAR)																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
<input type="radio"/> Marche MRC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Dommage structural 7 immédiat, 1 nervure brisée > 25mm long 3, débris 31	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Cogne dans peigne, jeu entre marche à plat > 6mm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Cogne dans peigne, jeu entre marche à plat > 6mm	<input type="radio"/> 3 immédiat. 000																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Pas d'engrènement avec levée 3 immédiat, jeu avec marche < 4mm OU > 6mm 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Marche MRC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 50% usé, pas enregre, 2 dents de suite brisées	<input type="radio"/> 000																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Marche MRC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 2 dents brisées/peigne, 1 dent brisée adjacente à 1 nervure usée 7 imm.	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Main courante (EMMCO)																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
<input type="radio"/> Main courante MCR	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Endommagée, jeu > 10mm, traction, écart de vitesse > 1 marche 3 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Brosse d'entrée BRE	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Lâche ou endommagée 7, brisée ou jeu > 10 mm 7 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Contrôle (EMCON)																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
<input type="radio"/> Arrêt balustrade TAB	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Coincé ou non-fonctionnel 3 immédiat, brisé 7 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Porte PCO	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Mal austé ou lâche 3, brisé 7 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Opercule OPE	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Brisé ou manquant 7 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Ronfleur SNI	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Non-fonctionnel 3, brisé 7	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Frein de service IFS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Distance arrêt < 1/3 marche (137mm) OU > 1.1 marches (450mm) 3 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Voyant arrêt nor. VNO	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Brûlé ou endommagé 7, sale 31	<input type="radio"/> Logé <input type="radio"/> Escalier																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Voyant blocage VBL	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Brûlé ou endommagé 7, sale 31	<input type="radio"/> Logé <input type="radio"/> Escalier																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Sélecteur à clef SEL	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Coincé ou non-fonctionnel 3, brisé 7 immédiat	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Interr. peigne ILM	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> CNIM1: Mécanisme non-fonctionnel (levée, recul) 3 immédiat, sale 31	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Interr. plinthe IPL	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> CNIM2: Mécanisme non-fonctionnel 3 immédiat, sale 31	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Fluorescent FLU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Non-fonctionnel 7, sale 31	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<input type="radio"/> Interr. entrée M/C IEM	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Non-fonctionnel 7 immédiat, sale 31	<input type="radio"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Commentaires - ajustement																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
<input type="radio"/> Erreur d'inscription (correction en commentaire) Feuille: EM00375084Q  Mission:																																																																																																																																																																																																																																																																																																					

ANNEXE III

EXEMPLE DE RAPPORT PRÉVISIONNEL



OptiGén
Maintenance inc.
Du 5% pour votre maintenance

Rapport prévisionnel

Table des matières

1.	Identification	2
2.	Mise en contexte	2
3.	Sources de données	2
3.1.	Équipements	3
3.2.	Télémétrie	4
3.3.	Entretien préventif	5
3.4.	Entretien Correctif	7
3.5.	Entretien curatif	9
4.	Statistiques de maintenance	12
4.1.	Coûts de maintenance	12
4.2.	Répartition du nombre d'interventions	13
4.3.	Distribution des interventions	14
4.4.	Impact sur la fiabilité: Matricule	15
4.5.	Impact sur la fiabilité: Composant	16
4.6.	Impact sur la fiabilité: Trimestre	17
4.7.	Caractéristiques des capteurs	18
5.	Maintenance prévisionnelle	20
5.1.	Préparation des données	20
5.2.	Classe de vie résiduelle	20
5.3.	Régression linéaire (RLG)	21
5.4.	Random Forest (RF)	23
5.5.	Decision Trees (CART)	25
5.6.	K plus proches voisins (KNN)	27
5.7.	Résultat pondéré	28
5.8.	Prévision	29
6.	Annexe 1. Tableaux des interventions à moins 20% du temps moyen	30
6.1.	Tableau des entretiens préventifs	30
6.2.	Tableau des entretiens correctifs	30
6.3.	Tableau des entretiens curatifs	31
7.	Annexe 2. Tableau comparatif des MTBF	32



1. Identification

No. rapport: 210503

Client: Interne

Mandat: Tête de série de rapport prévisionnelle

Analyste: Robert Vadeboncoeur, ing.

Équipement: 081 - 084

Date de production: lun. 03 mai 2021 16:55:05

Type: Rapport automatisé (Version régulière)

2. Mise en contexte

Le rapport prévisionnel fournit l'état de la fiabilité et la maintenance d'un groupe d'équipements. Il vise à améliorer la compréhension des différents aspects touchant la performance des équipements. Il est produit sur demande à partir du système FMDS.

Suite à l'analyse des intrants et résultats du système, quatre modèles prévisionnels sont utilisés pour mettre en lumière les dynamiques des pannes des équipements.

Finalement, on retrouve une prévision multiclassee des prochaines pannes.

Pour l'exercice, les données utilisées proviennent de Baylu Uz, Fidan (2016), Predictive Maintenance Modelling Guide R Notebook ,Azure AI Gallery.

Regroupement par classe des durées de vie

No	Classe	Durée_vie_probable
1	000~004	0-4 jours
2	005~014	5-14 jours
3	015~029	15-29 jours
4	030~044	30-44 jours
5	045~059	45-59 jours
6	060~089	60-89 jours
7	090~119	90-119 jours
8	120+	120 jours et +

3. Sources de données

- Historique des pannes d'un équipement ou d'un composant de l'équipement.
- Historique de maintenance: codes d'erreur, activités de maintenance précédentes ou remplacements de composants.
- Conditions et utilisation de l'équipement: données collectées à partir de capteurs.
- Caractéristiques de l'équipement: identifiant, nom, modèle, âge, etc.



3.1. Équipements

L'analyse porte sur un groupe de 4 séchoirs industriels.

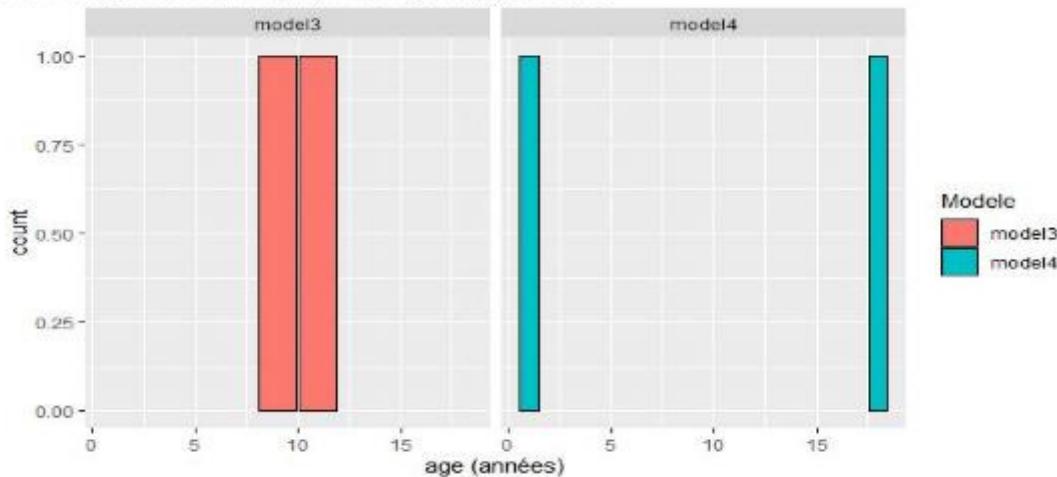
Les informations sur les équipements sont: le numéro d'équipement, l'identifiant, le modèle et l'âge, qui correspond au nombre d'années en service.

Nombre d'équipement: 4

3.1.1. Liste des équipements

Equip_ID	NomEquip	Modele	age	DispSem
081	Equip_81	model4	1	40
082	Equip_82	model3	11	40
083	Equip_83	model4	18	40
084	Equip_84	model3	9	40

3.1.2. Répartition des équipements par âge/modèles



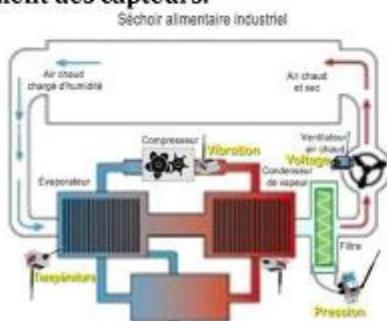


3.2. Télémétrie

La principale source de données est la série chronologique de télémétrie. Elle comprend les mesures physiques telles que la pression, la vibration, la température, le voltage ... Ces mesures sont collectées en temps réel par équipement, et la moyenne de toutes les heures collectées au cours de la période d'analyse est transmise.

Afin d'améliorer la qualité des prévisions, il est important de s'assurer que les capteurs de télémétrie retenus soient susceptibles de détecter une détérioration des composants. On peut, par exemple, tester avec plusieurs types/localisations de capteurs ceux qui sont le plus efficaces et ne retenir que ceux-ci.

3.2.1. Schéma de positionnement des capteurs.



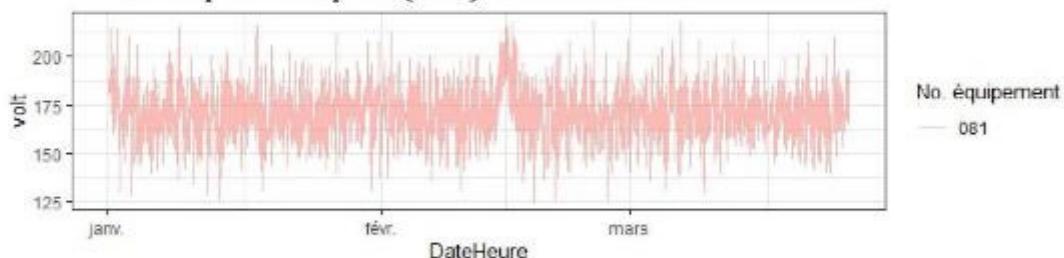
Nombre total d'enregistrements : 35040

Période couverte: 2015-01-01 au 2016-01-01

3.2.2. Entête de liste

Date/Heure	Equip_ID	volt	temp	pression	vibration
2015-01-01 06:00:00	081	179.9798	387.2182	100.0197	37.32758
2015-01-01 07:00:00	081	188.5138	486.5026	108.1079	39.76838
2015-01-01 08:00:00	081	181.8109	407.5267	116.9360	42.16622
2015-01-01 09:00:00	081	193.6626	469.5789	84.6295	35.56664

3.2.3. Lecture du premier capteur (volt)





3.3. Entretien préventif

Les actions de maintenance préventive ont pour but de réduire les arrêts de production coûteux et perturbant la production afin de conserver le niveau de service dans les normes attendues. Un enregistrement est généré pour chaque composant suivi lors de l'entretien préventif. Le TTR est exprimé en jours.

2 doublon(s) ont été supprimé(s)

Nombre total d'enregistrements d'entretien préventif: 142

3.3.1. Entête de liste

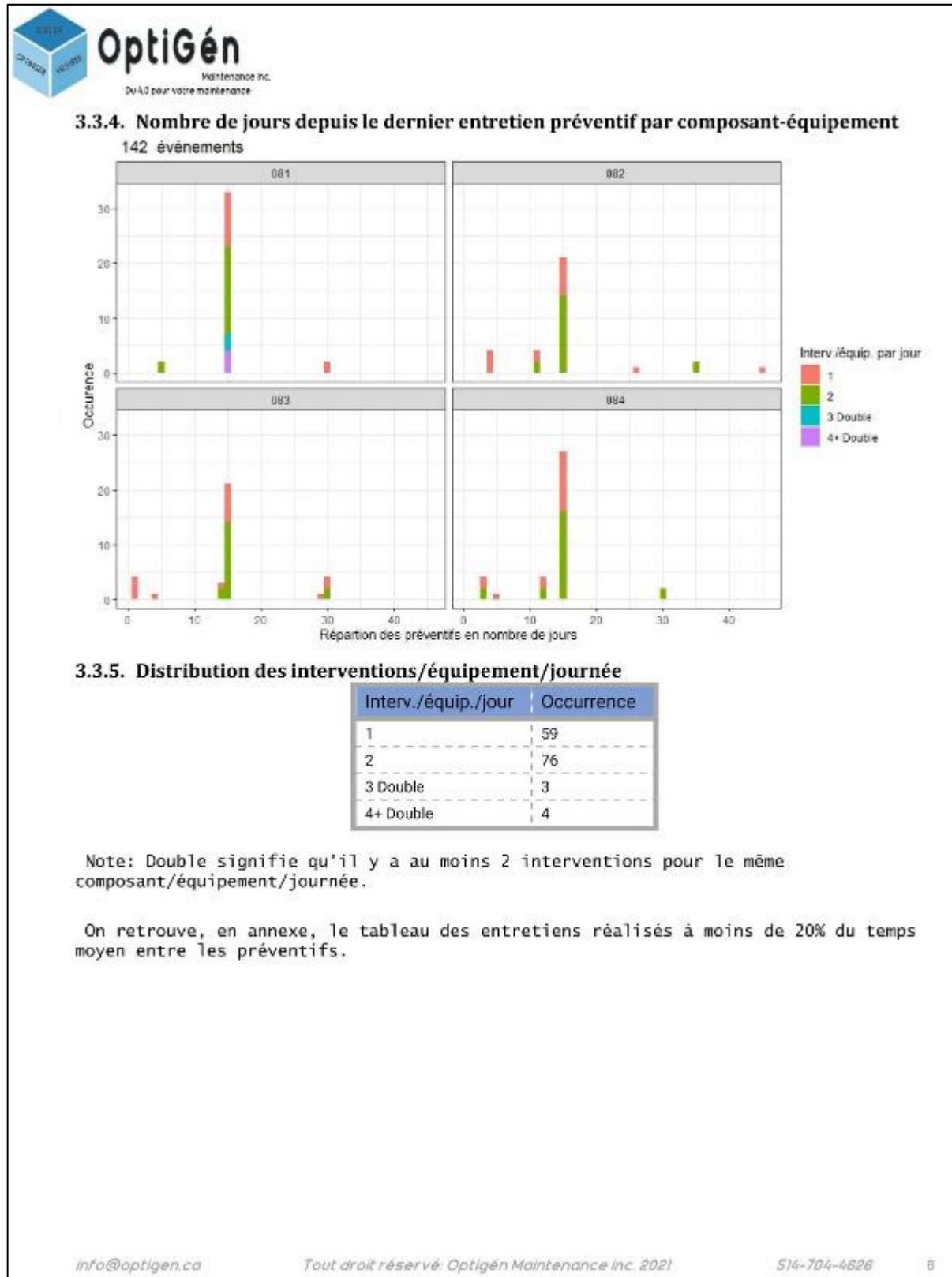
Date/Heure	Equip_ID	Cost	TTRJrs	Ordre	Matricule	Composant	Trimestre
2015-01-02 06:00:00	081	103	0.81	64446	125	comp3	1
2015-01-02 06:00:00	081	20	0.69	64447	96	comp1	1
2015-01-17 06:00:00	081	22	0.57	64095	125	comp2	1
2015-02-16 06:00:00	081	42	0.45	73148	112	comp1	1

3.3.2. Nombre d'entretien préventif par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp3	comp4	Global
081	13	9.0	10	5	37.0
082	13	5.0	9	6	33.0
083	7	9.0	8	10	34.0
084	7	11.0	9	11	38.0
Moyenne	10	8.5	9	8	35.5

3.3.3. Temps moyen (jr) entre deux entretiens préventifs par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp3	comp4	Global
081	28.1	40.6	36.5	73.0	9.9
082	28.1	73.0	40.6	60.8	11.1
083	52.1	40.6	45.6	36.5	10.7
084	52.1	33.2	40.6	33.2	9.6
Moyenne	36.5	42.9	40.6	45.6	10.3





3.4. Entretien Correctif

La maintenance corrective est une intervention qui apporte une amélioration des performances et des conditions de production. Elle permet l'installation de machines neuves et la remise en état, le reconditionnement et le déplacement des machines existantes sur site ou en atelier. Ce sont des composants remplacés ou actions effectuées lors de l'entretien correctif (faute), c'est-à-dire que l'équipement est toujours opérationnel et ne constituent pas une interruption de la mission de l'équipement.

Nombre total d'enregistrements d'entretien correctif: 155

3.4.1. Entête de liste

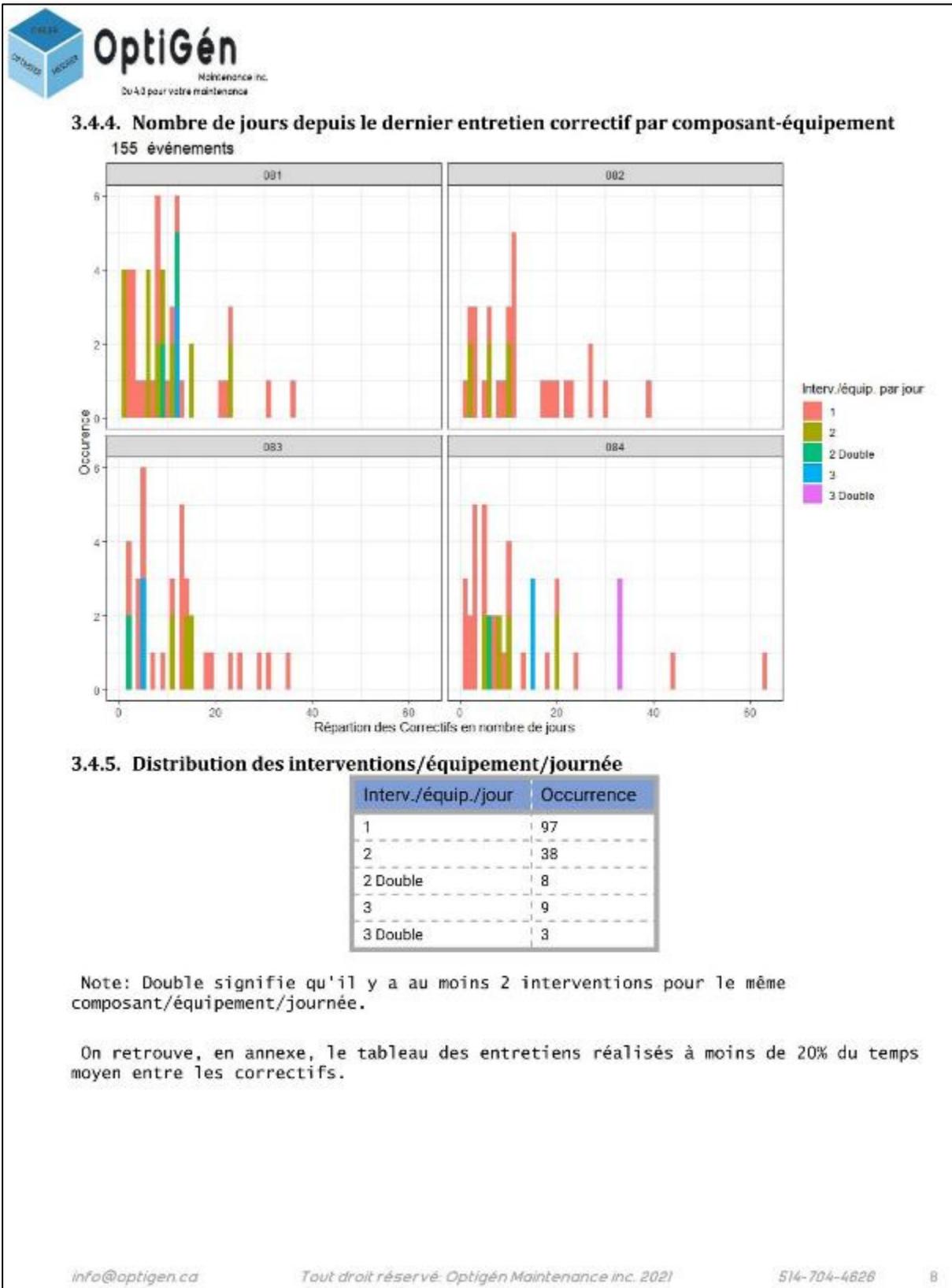
DateHeure	Equip_ID	Cost	TTRJrs	Ordre	Matricule	Composant	Trimestre
2015-01-01 06:00:00	081	107	1.16	63577	96	comp1	1
2015-01-16 06:00:00	081	57	0.83	63977	125	comp2	1
2015-01-16 06:00:00	081	141	1.32	63983	96	comp3	1
2015-01-19 18:00:00	081	146	1.55	64297	96	comp4	1

3.4.2. Nombre d'entretien correctif par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp3	comp4	Global
081	19.0	14.0	8.0	8.0	49.0
082	11.0	8.0	5.0	7.0	31.0
083	8.0	11.0	13.0	3.0	35.0
084	16.0	10.0	11.0	3.0	40.0
Moyenne	13.5	10.8	9.2	5.2	38.8

3.4.3. Temps moyen (jr) entre deux entretiens correctifs par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp3	comp4	Global
081	19.2	26.1	45.6	45.6	7.4
082	33.2	45.6	73.0	52.1	11.8
083	45.6	33.2	28.1	121.7	10.4
084	22.8	36.5	33.2	121.7	9.1
Moyenne	27.0	33.8	39.7	70.2	9.4





3.5. Entretien curatif

Ce sont des retours techniques de remplacements de composants suite à un arrêt de la mission de l'équipement. La maintenance curative est un dépannage prioritaire, car les arrêts de production provoquent des pertes lourdes pour les entreprises. Chaque enregistrement (Panne) contient une date/heure, l'ID de l'équipement et un type de composant défaillant.

Nombre total d'enregistrements de curatif : 33

3.5.1. Entête de liste

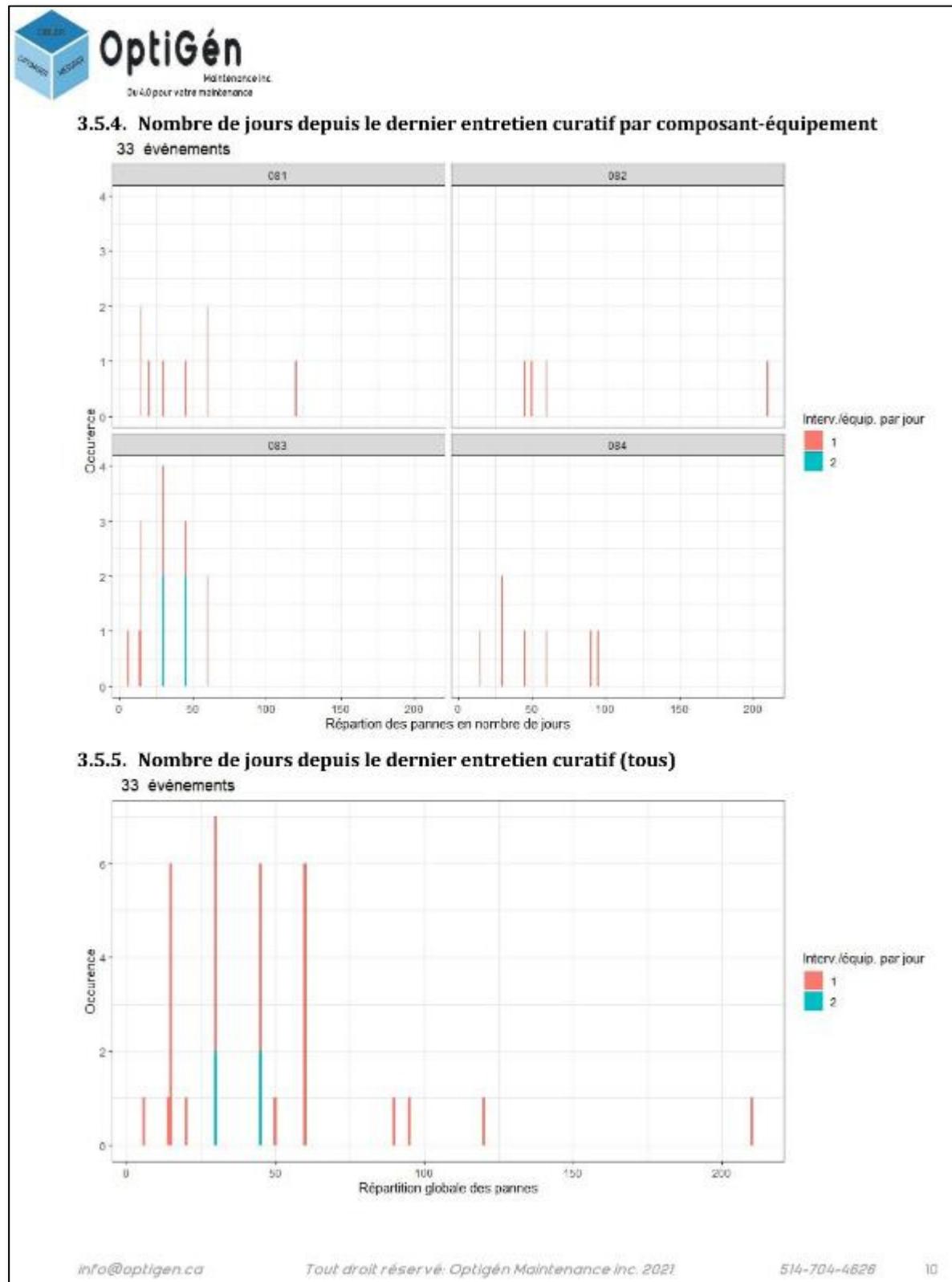
Date/Heure	Equip_ID	Cost	TTRJrs	Ordre	Matricule	Composant	Trimestre
2015-01-02 06:00:00	081	234	2.97	64414	125	comp1	1
2015-01-17 06:00:00	081	333	2.43	64060	125	comp2	1
2015-02-16 06:00:00	081	396	2.15	73110	125	comp1	1
2015-03-03 06:00:00	081	315	4.52	75916	112	comp2	1

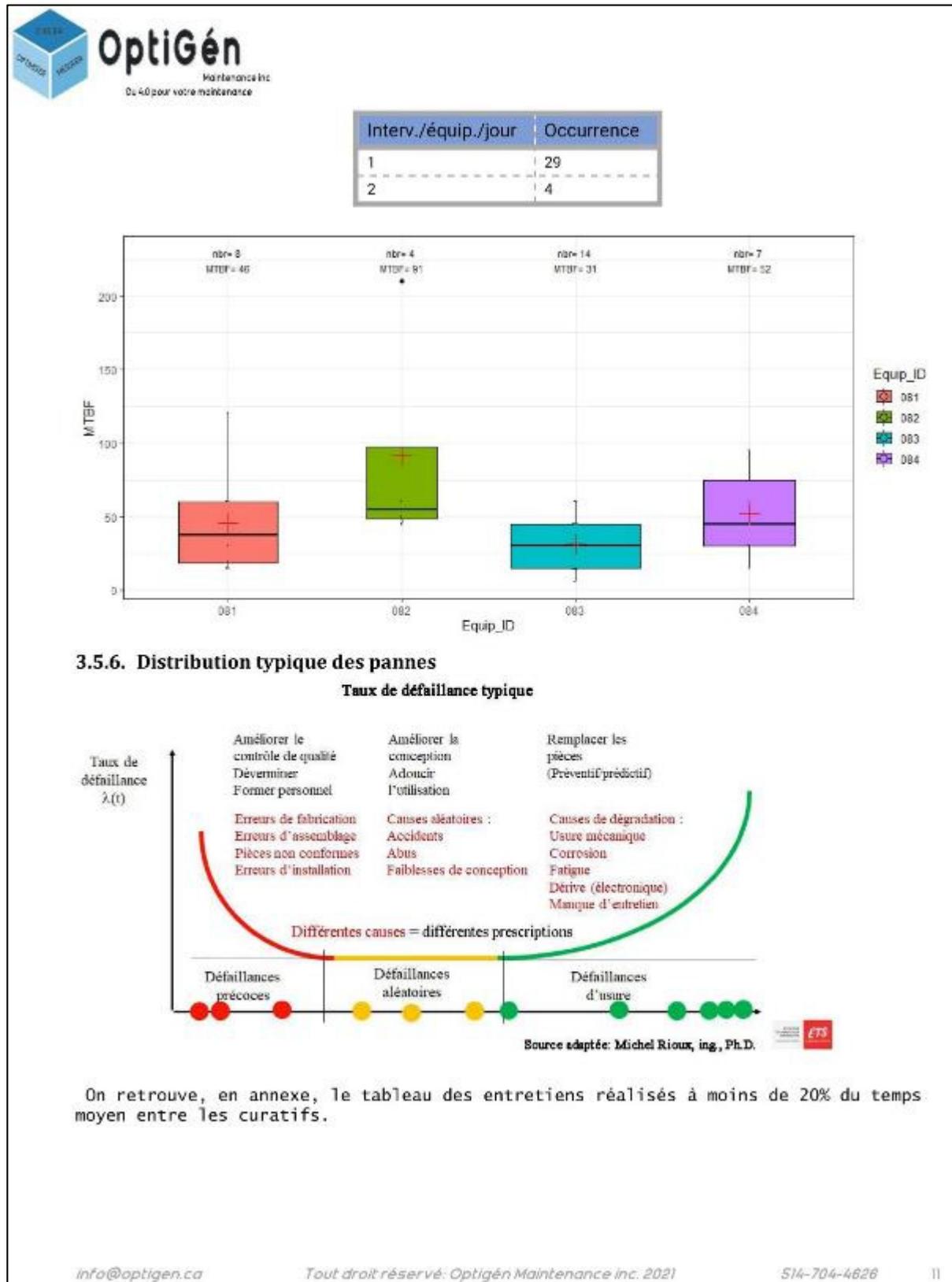
3.5.2. Nombre d'entretien curatif par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp4	Global
081	2	6.0	0.0	8.0
082	3	1.0	0.0	4.0
083	4	4.0	6.0	14.0
084	3	4.0	0.0	7.0
Moyenne	3	3.8	1.5	8.2

3.5.3. Temps moyen (jr) entre deux entretiens curatifs par composant-équipement

No_Equip	comp1	comp2	comp4	Global
081	182.5	60.8	Inf	45.6
082	121.7	365.0	Inf	91.2
083	91.2	91.2	60.8	26.1
084	121.7	91.2	Inf	52.1
Moyenne	121.7	96.1	243.3	44.5







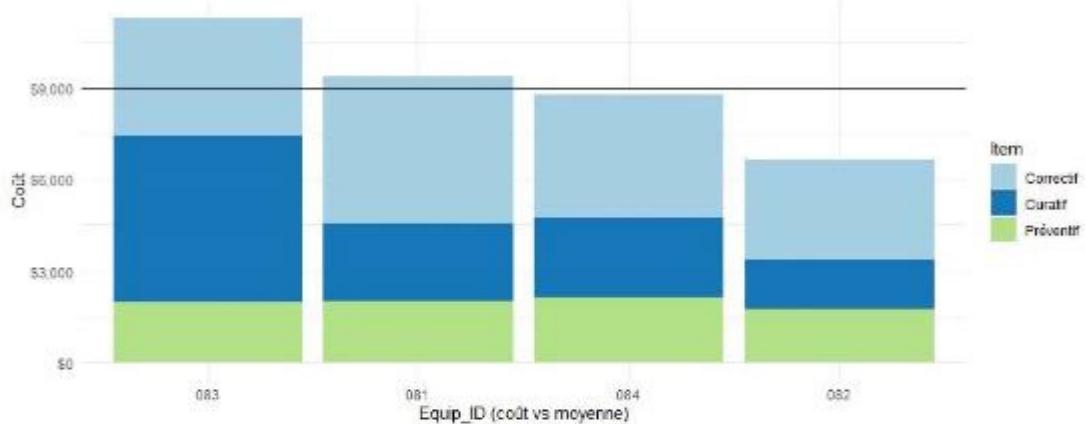
4. Statistiques de maintenance

Répartitions des entretiens préventifs, correctifs et curatifs

4.1. Coûts de maintenance

Notez que les coûts incluent la main-d'œuvre maintenance, les pièces et les coûts d'arrêts de production.

4.1.1. Répartition des coûts d'intervention (\$)



4.1.2. Tableau des coûts d'intervention (\$)

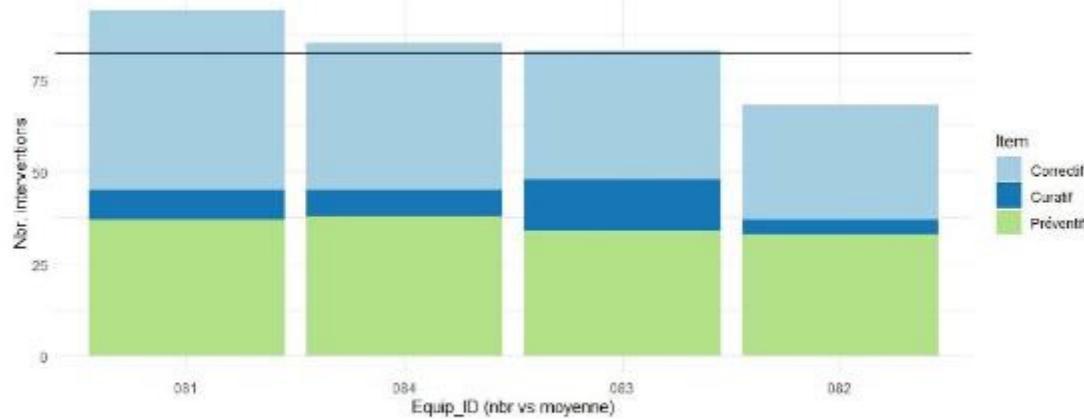
Item	081	082	083	084	Total
Correctif	\$4,811	\$3,296	\$3,847	\$4,029	\$15,983
Curatif	\$2,556	\$1,593	\$5,436	\$2,592	\$12,177
Préventif	\$2,001	\$1,757	\$1,990	\$2,135	\$7,883
Total	\$9,368	\$6,646	\$11,273	\$8,756	\$36,043

4.1.3. Répartition des coûts d'intervention (%)

Item	081	082	083	084	Total
Correctif	51%	50%	34%	46%	44%
Curatif	27%	24%	48%	30%	34%
Préventif	21%	26%	18%	24%	22%
Total	26%	18%	31%	24%	100%



4.2. Répartition du nombre d'interventions



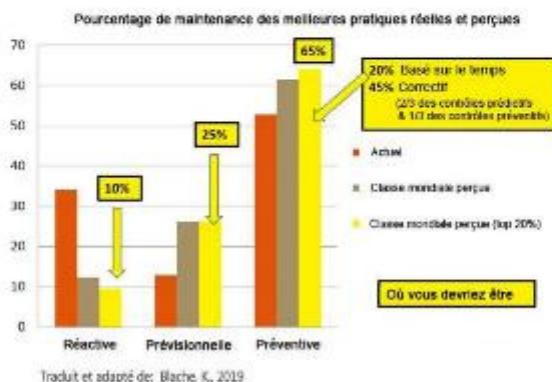
4.2.1. Tableau du nombre d'interventions (Nbr)

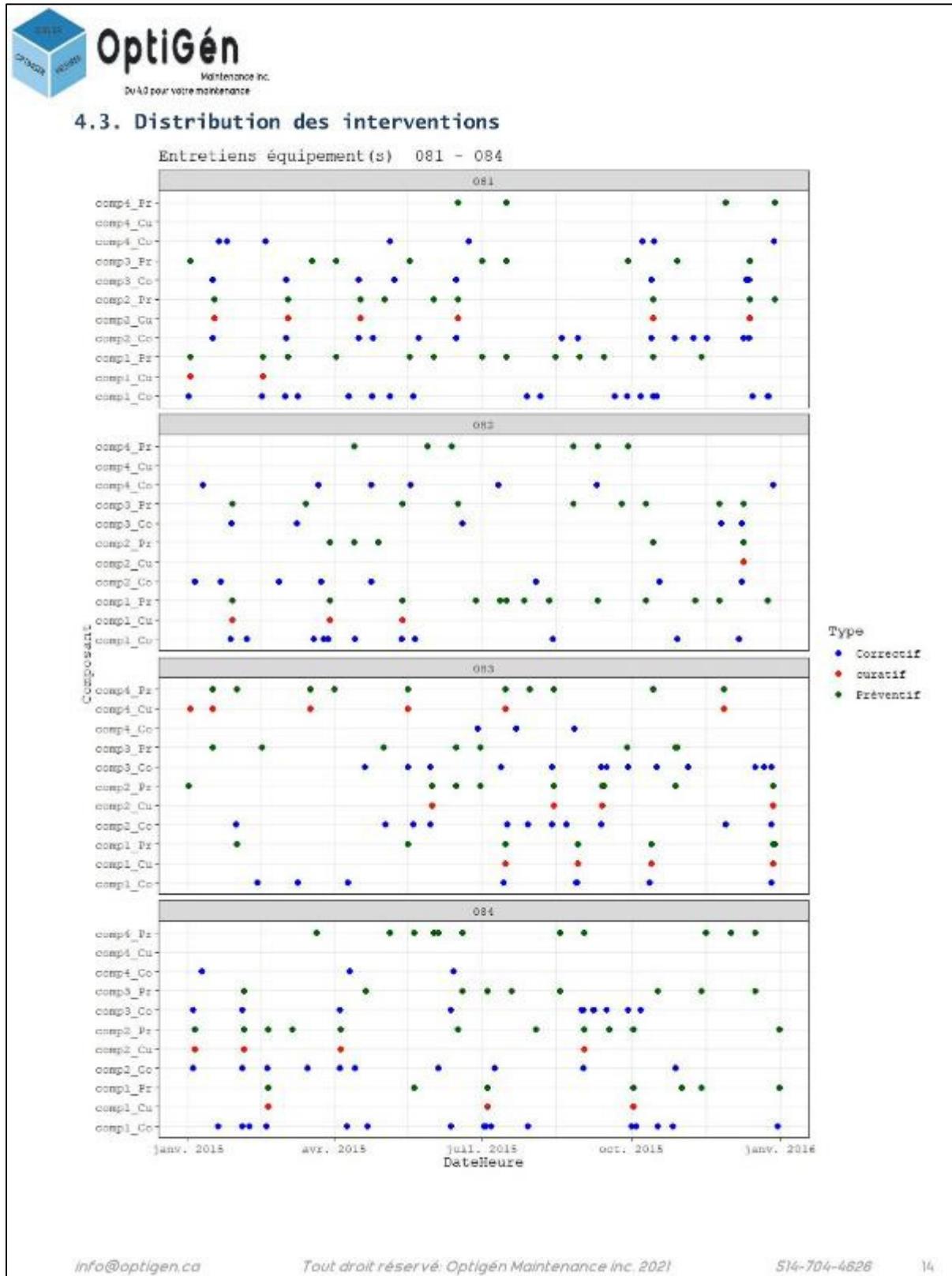
Item	081	082	083	084	Total
Correctif	49	31	35	40	155
Curatif	8	4	14	7	33
Préventif	37	33	34	38	142
Total	94	68	83	85	330

4.2.2. Répartition des types d'interventions (%)

Item	081	082	083	084	Total
Correctif	52%	46%	42%	47%	47%
Curatif	9%	6%	17%	8%	10%
Préventif	39%	49%	41%	45%	43%
Total	10%	20%	25%	25%	100%

Objectifs de répartition des types de maintenance

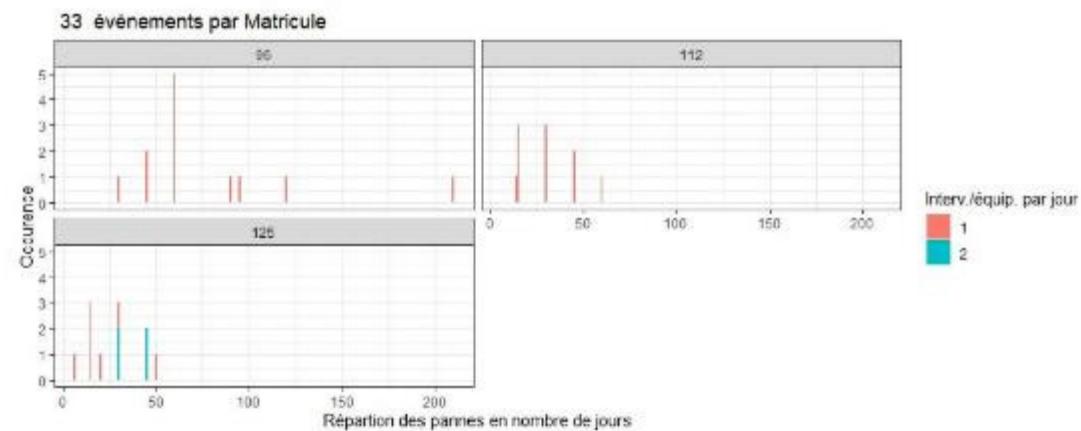






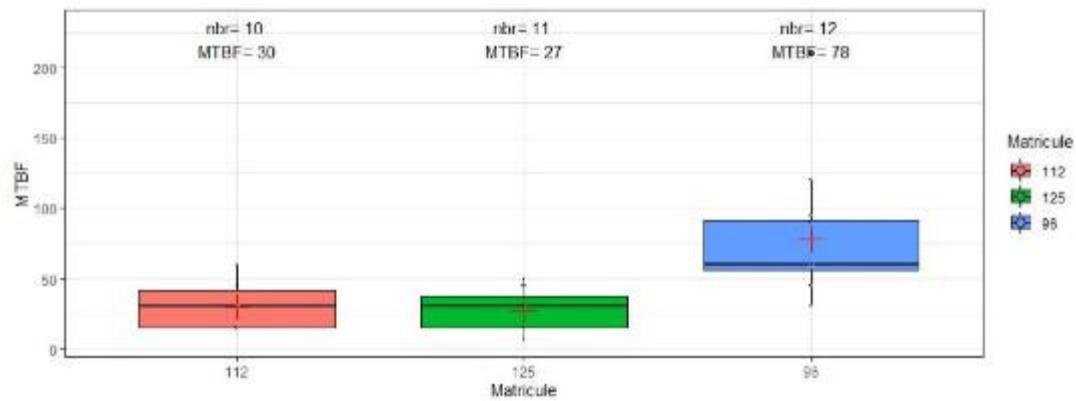
4.4. Impact sur la fiabilité: Matricule

Ce chapitre vise à vérifier s'il y a une différence dans le TBF en fonction des intervenants.



La colonne 'Prob_moy_diff' donne la probabilité que la moyenne réelle de la variable X soit différente de la variable Y compte tenu des observations (test ANOVA).

X	X_moy	X_n	X_sd	Y	Y_moy	Y_n	Y_sd	dif_XY	Prob_moy_diff
112	29.9	10	15.9	125	27.4	11	14.6	2.5	29.3 %
112	29.9	10	15.9	96	77.9	12	48.4	-48.0	99.3 %
125	27.4	11	14.6	96	77.9	12	48.4	-50.5	99.7 %



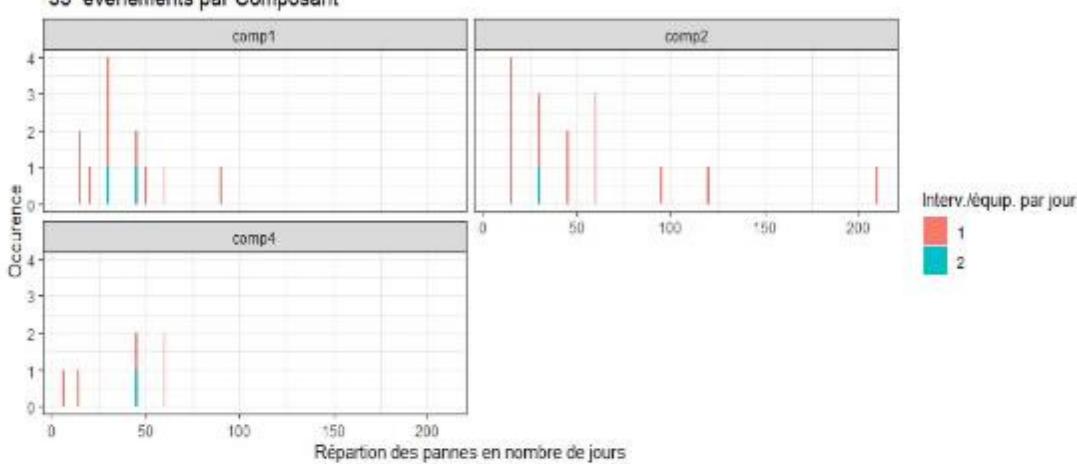


OptiGén
 Maintenance inc.
 Du 4.0 pour votre maintenance

4.5. Impact sur la fiabilité: Composant

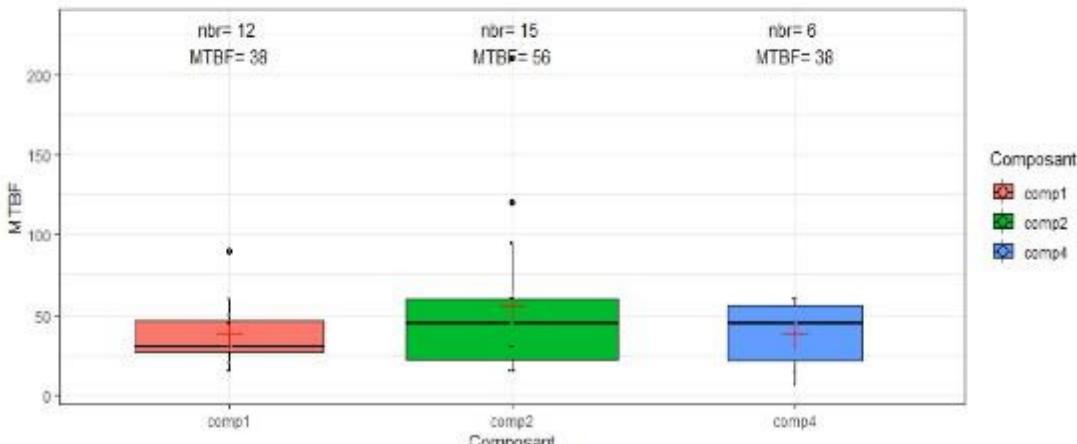
Ce chapitre vise à vérifier s'il y a une différence dans le TBF en fonction des composants.

33 événements par Composant



La colonne 'Prob_moy_diff' donne la probabilité que la moyenne réelle de la variable X soit différente de la variable Y compte tenu des observations (test ANOVA).

X	X_moy	X_n	X_sd	Y	Y_moy	Y_n	Y_sd	dif_XY	Prob_moy_diff
comp1	38.3	12	21.5	comp2	56.3	15	52.4	-18	72.5 %
comp1	38.3	12	21.5	comp4	38.3	6	23.1	0	0 %
comp2	56.3	15	52.4	comp4	38.3	6	23.1	18	56.7 %

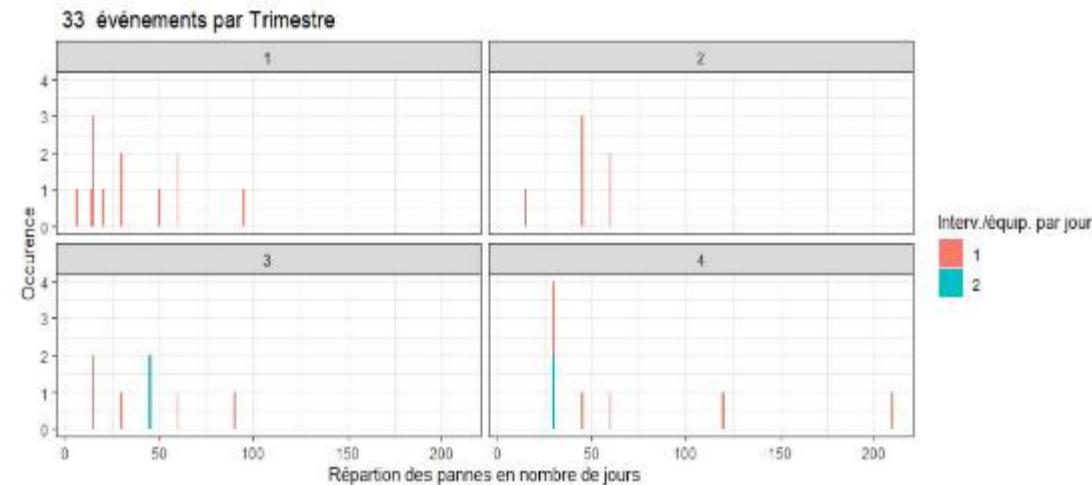


info@optigen.ca Tout droit réservé: OptiGén Maintenance inc. 2021 514-704-4628 18



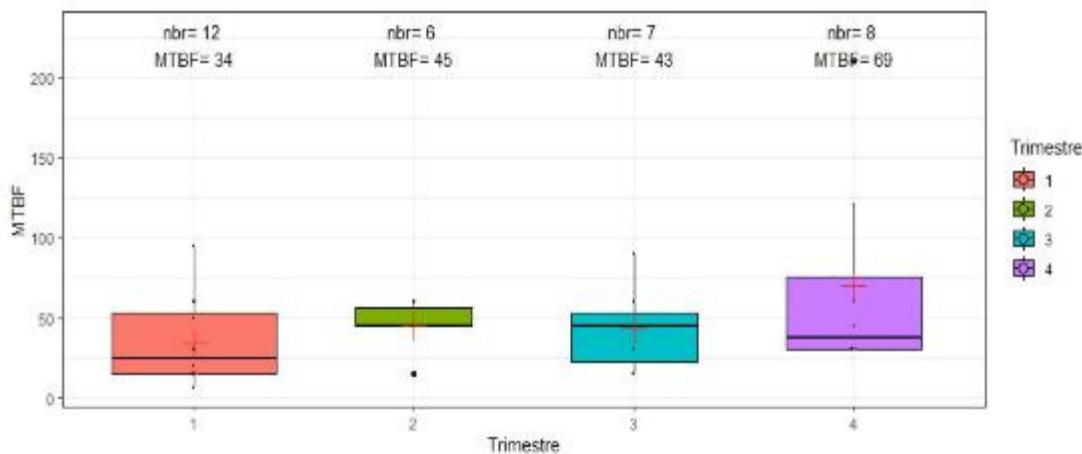
4.6. Impact sur la fiabilité: Trimestre

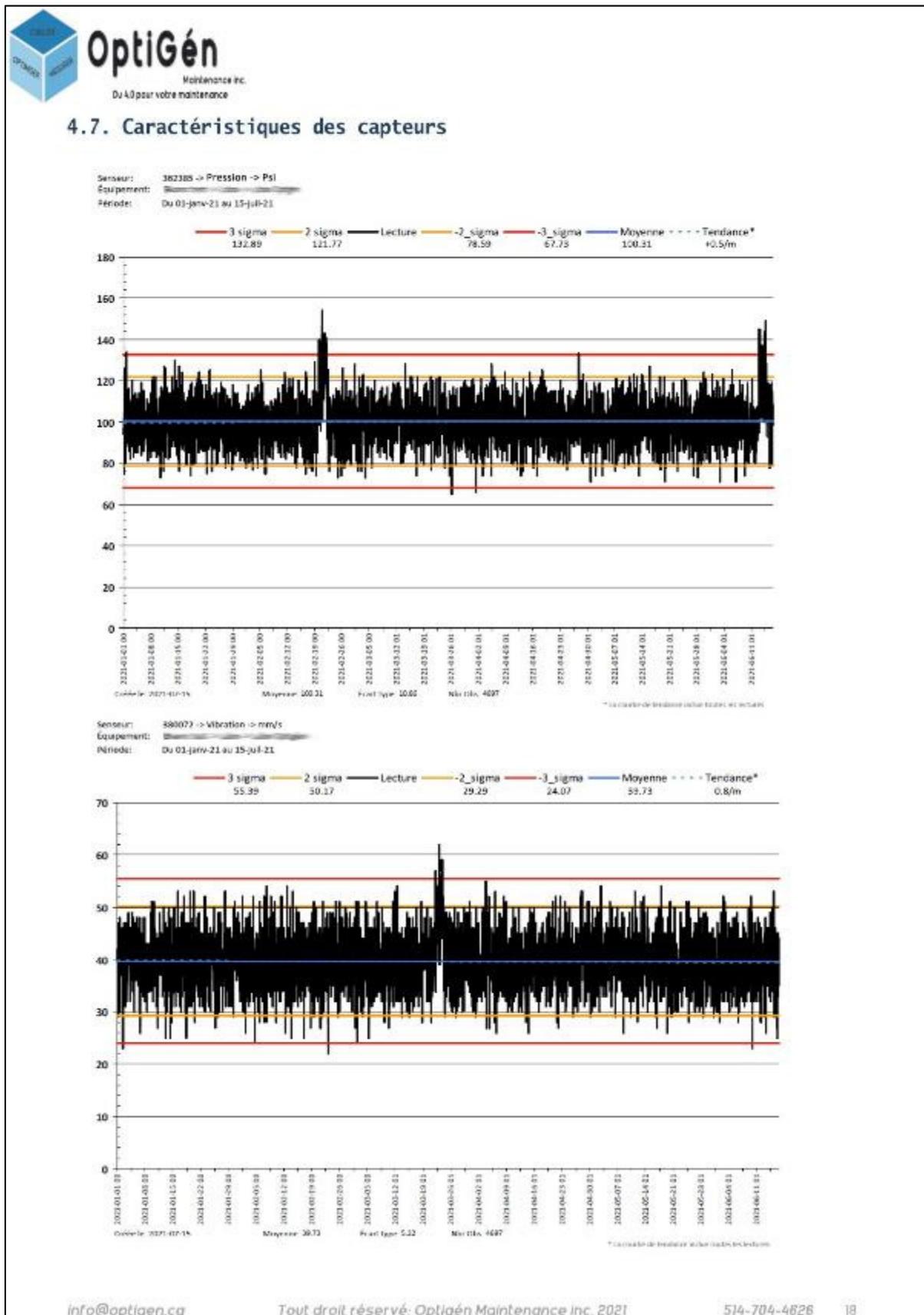
Ce chapitre vise à vérifier s'il y a une différence dans le TBF en fonction du trimestre.

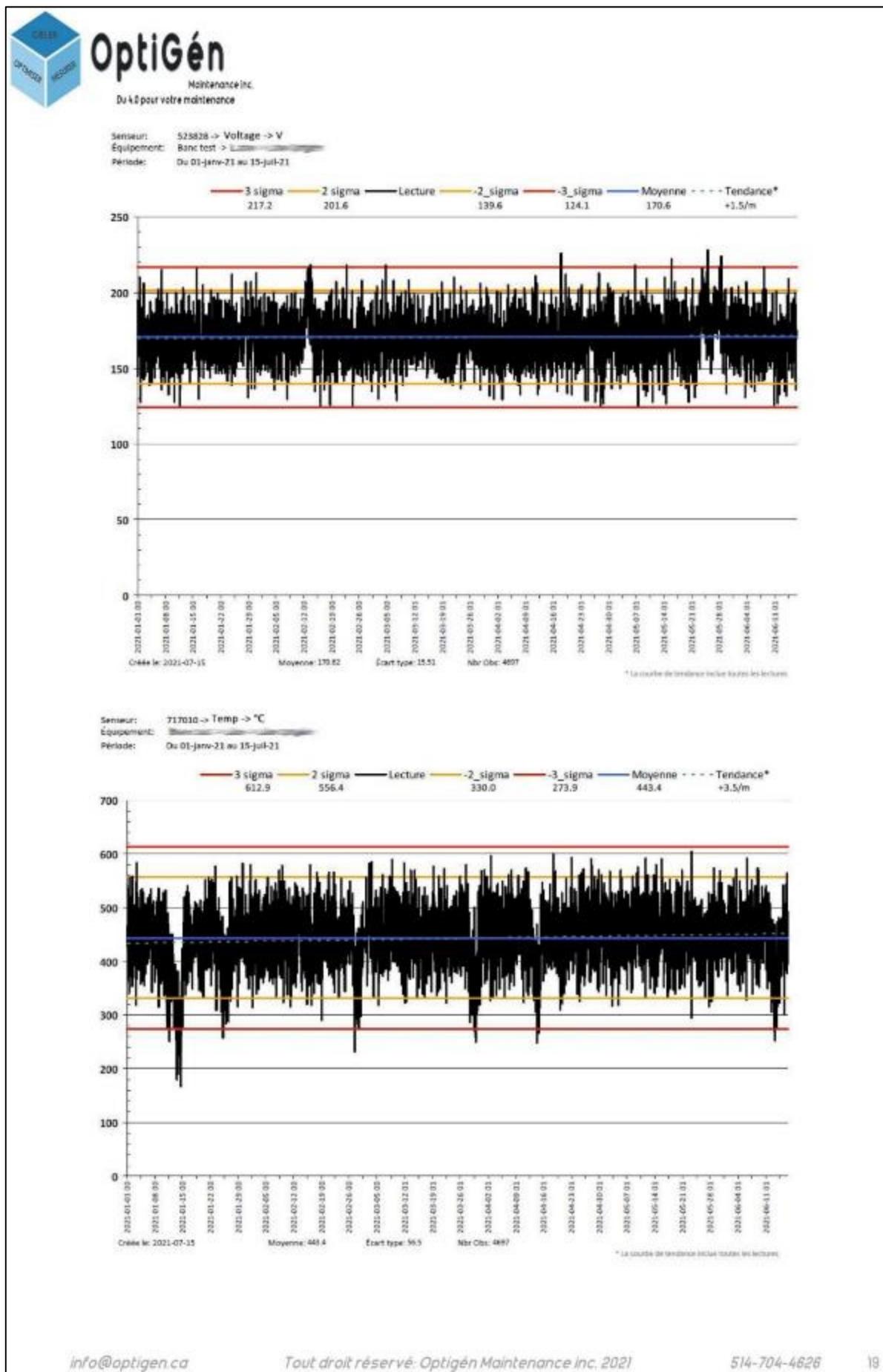


La colonne 'Prob_moy_diff' donne la probabilité que la moyenne réelle de la variable X soit différente de la variable Y compte tenu des observations (test ANOVA).

X	X_moy	X_n	X_sd	Y	Y_moy	Y_n	Y_sd	dif_XY	Prob_moy_diff
1	34.2	12	26.7	2	45.0	6	16.4	-10.8	62.1 %
1	34.2	12	26.7	3	42.9	7	26.6	-8.7	49.8 %
1	34.2	12	26.7	4	69.4	8	64.6	-35.2	89.4 %
2	45.0	6	16.4	3	42.9	7	26.6	2.1	13.3 %
2	45.0	6	16.4	4	69.4	8	64.6	-24.4	61.1 %
3	42.9	7	26.6	4	69.4	8	64.6	-26.5	66.9 %









5. Maintenance prévisionnelle

5.1. Préparation des données

Cette étape consiste à réunir les différentes sources de données afin de créer des fonctionnalités décrivant le mieux la condition d'un équipement à un moment donné.

Les données de télémétrie viennent presque toujours avec des horodatages, ce qui les rend idéales pour le calcul des caractéristiques. Une méthode courante consiste à choisir une taille de fenêtre pour les caractéristiques de décalage à créer et à calculer des mesures globales mobiles telles que la moyenne, l'écart type, le minimum, le maximum, etc. afin de représenter l'historique à court terme de la télémétrie sur la fenêtre de décalage. Nous utiliserons la moyenne mobile et l'écart type des données aux 3 heures et aux 24 heures.

Nombre de lignes incomplètes exclues: 1105(9%)

5.2. Classe de vie résiduelle

Les premiers 80 % des données seront utilisé pour entraîner le modèle.

Les derniers 20 % des données seront utilisé pour tester le modèle.

Les variables utilisées pour l'analyse sont:

`ClasVieResid ~ Equip_ID + Modele + age + volt_moy + temp_moy + pression_moy + vibration_moy + volt_sd + temp_sd + pression_sd + vibration_sd + volt_max + temp_max + pression_max + vibration_max + Since_comp1_Co + Since_comp2_Co + Since_comp3_Co + Since_comp4_Co + Since_comp1_Pr + Since_comp2_Pr + Since_comp3_Pr + Since_comp4_Pr + Since_comp1_Cu + Since_comp2_Cu + Since_comp3_Cu + Since_comp4_Cu + Matricule + Trimestre + Date`

Définitions des variables des senseurs

<code>_moy</code>	Moyenne sur la période de regroupement
<code>_sd</code>	Déviation standard sur la période de regroupement
<code>_max</code>	Maximum du senseur sur la période de regroupement
<code>_min</code>	minimum du senseur sur la période de regroupement
<code>Since_Co_</code>	Période depuis la dernière faute (correctif)
<code>Since_Pr_</code>	Période depuis le dernier entretien préventif
<code>Since_Cu_</code>	Période depuis la dernière panne (curatif)
<code>Date</code>	Date/heure du regroupement



5.3. Régression linéaire (RLG)

5.3.1. Matrice de confusion (Réel vs prédit)

Reel_Predic	000~004	005~014	015~029	030~044	045~059	060~089	090~119	120+
000~004	165	27	25	1	0	0	0	0
005~014	9	96	31	0	0	0	0	0
015~029	20	80	144	7	0	0	0	0
030~044	3	74	118	100	0	0	0	0
045~059	23	160	121	1	0	0	0	0
060~089	30	81	244	126	120	72	0	0
090~119	2	0	0	113	120	4	0	0
120+	0	0	0	0	0	0	0	0

XX Précision

XX Adjacent

Statistiques de prédiction

Nombre d'équipements: 4

Nombre d'entretien curatif: 33

Nombre d'observations: 2117

Précision: 27.26 %

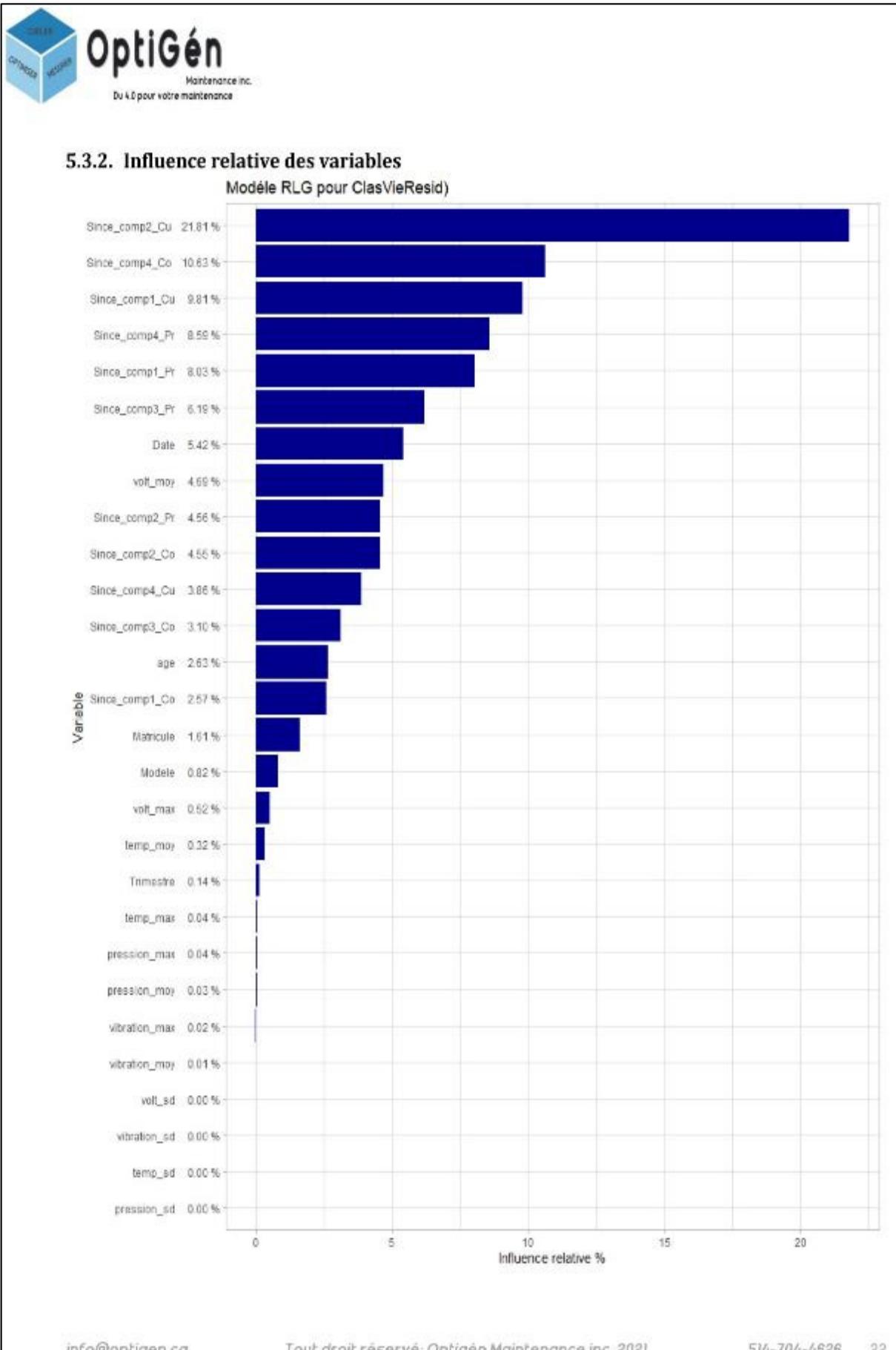
Précision adjacente: 46.01 %

Précision-macro: 54.21 %

Sensibilité: 32.64 %

Rappel: 0.33

F1: 0.26





5.4. Random Forest (RF)

5.4.1. Matrice de confusion (Réel vs prédit)

Reel_Predic	000~004	005~014	015~029	030~044	045~059	060~089	090~119	120+
000~004	170	156	24	1	0	0	0	0
005~014	10	37	47	38	2	0	0	0
015~029	17	75	265	85	93	3	0	0
030~044	0	3	1	95	14	0	0	0
045~059	7	85	104	1	11	1	0	0
060~089	29	159	219	109	120	72	0	0
090~119	19	2	23	19	0	0	0	0
120+	0	1	0	0	0	0	0	0

XX	Précision
XX	Adjacent

5.4.2. Statistiques de prédiction

Nombre d'équipements: 4

Nombre d'entretien curatif: 33

Nombre d'observations: 2117

Précision: 30.7 %

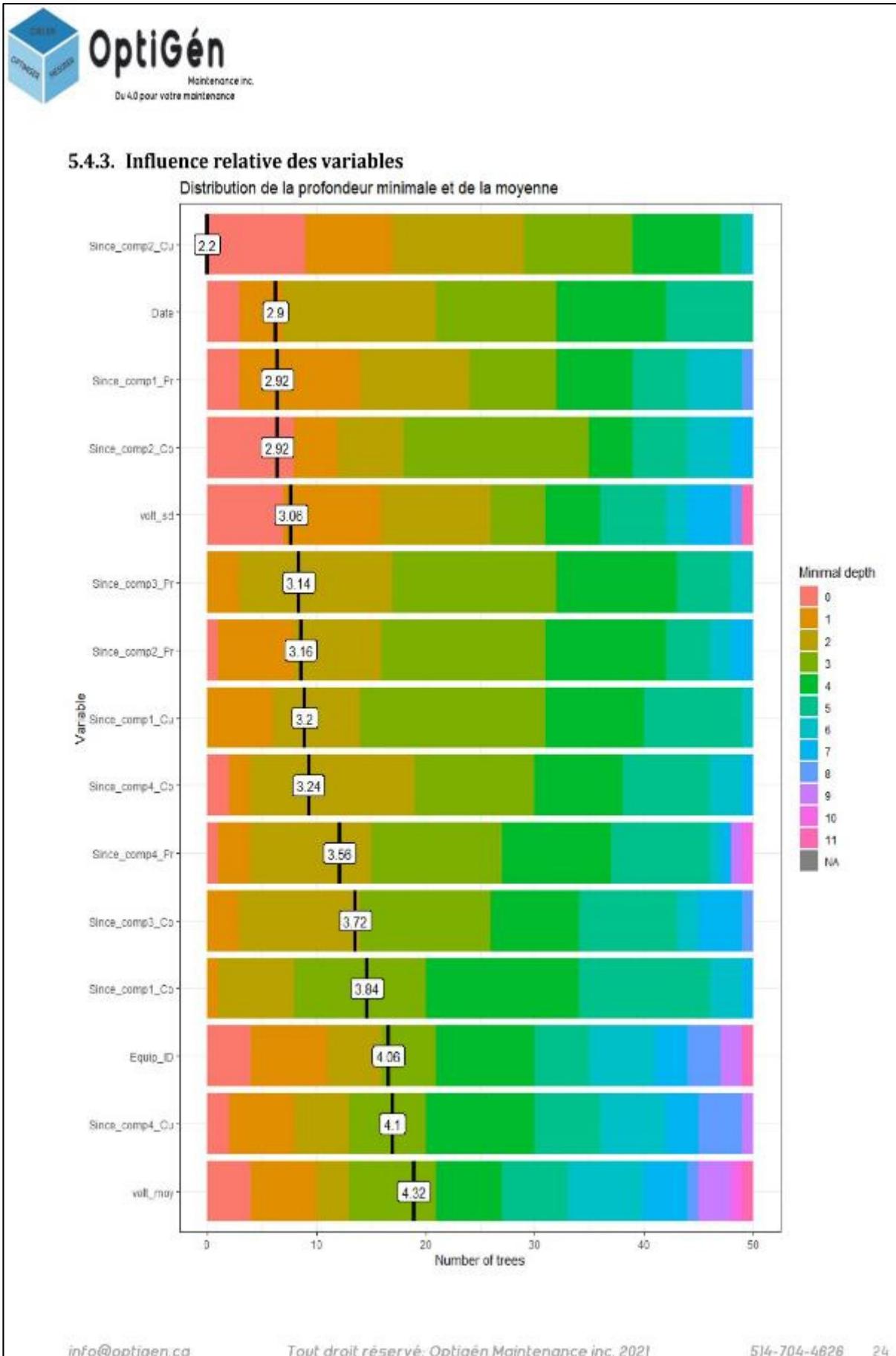
Précision adjacente: 54.79 %

Précision-macro: 54.46 %

Sensibilité: 34.29 %

Rappel: 0.34

F1: 0.25





5.5. Decision Trees (CART)

5.5.1. Matrice de confusion (Réel vs prédit)

Reel_Predic	000~004	005~014	015~029	030~044	045~059	060~089	090~119	120+
000~004	139	3	22	3	0	0	0	0
005~014	31	114	68	0	0	0	0	0
015~029	0	1	111	0	0	0	0	0
030~044	0	1	118	100	0	0	0	0
045~059	9	82	233	7	0	0	0	0
060~089	55	238	130	120	120	72	0	0
090~119	18	79	1	118	120	4	0	0
120+	0	0	0	0	0	0	0	0

XX	Précision
XX	Adjacent

5.5.2. Statistiques de prédiction

Nombre d'équipements: 4

Nombre d'entretien curatif: 33

Nombre d'observations: 2117

Précision: 25.32 %

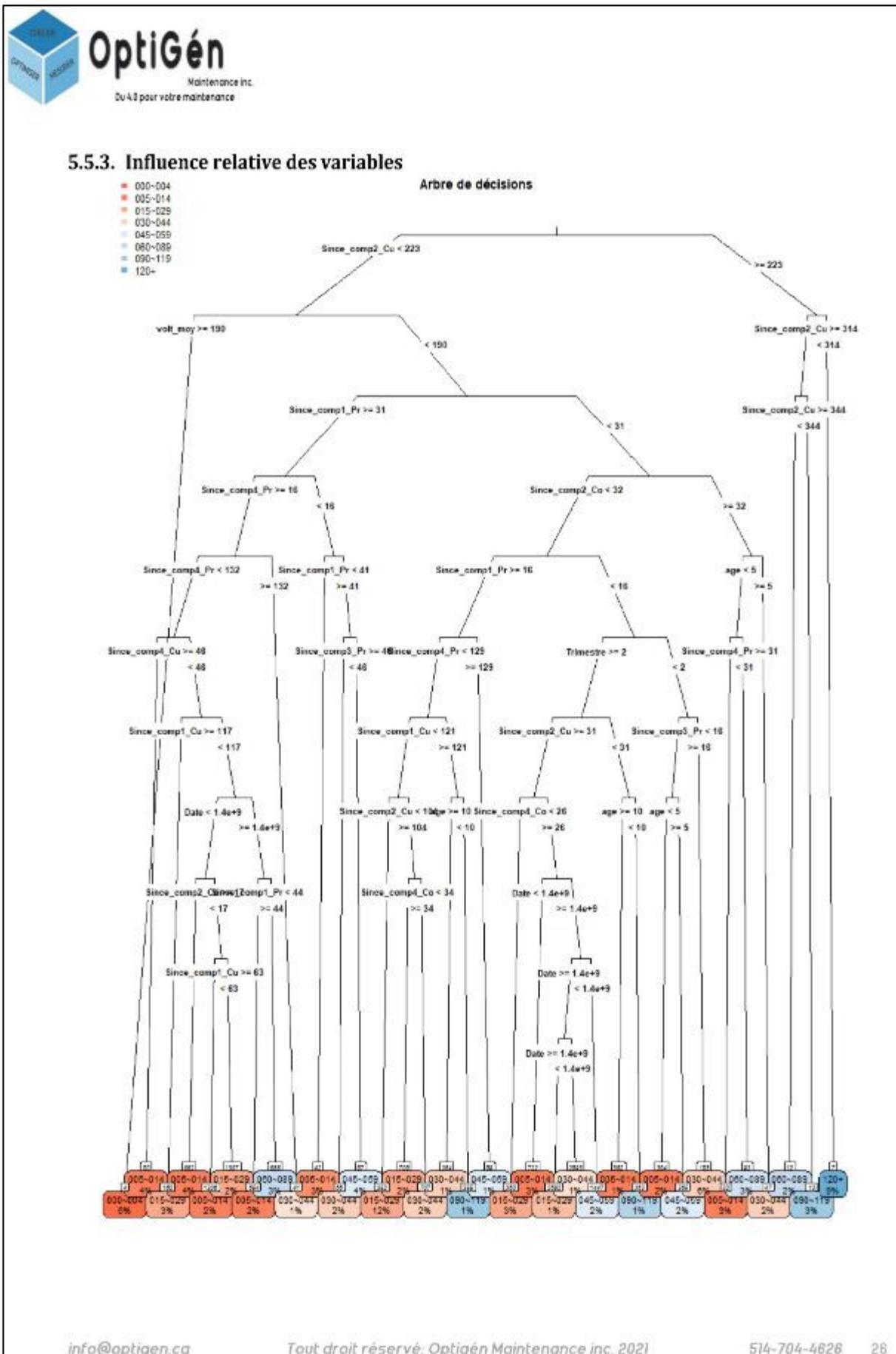
Précision adjacente: 41.95 %

Précision-macro: 53.73 %

Sensibilité: 30.99 %

Rappel: 0.31

F1: 0.26





5.6. K plus proches voisins (KNN)

5.6.1. Matrice de confusion (Réel vs prédit)

Reel_Predic	000~004	005~014	015~029	030~044	045~059	060~089	090~119	120+
000~004	29	25	30	0	20	16	0	0
005~014	35	52	32	2	0	56	0	0
015~029	13	80	28	0	0	0	0	0
030~044	151	320	512	345	216	4	0	0
045~059	8	23	6	0	4	0	0	0
060~089	2	0	28	0	0	0	0	0
090~119	14	18	39	1	0	0	0	0
120+	0	0	8	0	0	0	0	0

XX Précision

XX Adjacent

11.5.2 Statistiques de prédition

Nombre d'équipements: 4

Nombre d'entretien curatif: 33

Nombre d'observations: 2117

Précision: 21.63 %

Précision adjacente: 64.15 %

Précision-macro: 45.41 %

Sensibilité: 18.06 %

Rappel: 0.18

F1: 0.11



OptiGén
Maintenance Inc.
DU A à pour votre maintenance

5.7. Résultat pondéré

Le résultat pondéré fait la moyenne des 4 premières prévisions pondérées par la précision de celles-ci.

$$No \text{ prévision \text{ pondérée}} = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^4 No \text{ prévision}(i) * \text{précision adjacente}(i)}{\sum_{i=1}^4 \text{précision adjacente}(i)} \right) + 0.5 \right]$$

5.7.1. Matrice de confusion (Réel vs prédit)

Reel_Predic	000~004	005~014	015~029	030~044	045~059	060~089	090~119	120+
000~004	48	3	0	0	0	0	0	0
005~014	108	114	41	1	0	0	0	0
015~029	20	6	172	0	0	0	0	0
030~044	26	188	134	108	20	16	0	0
045~059	28	186	276	220	205	59	0	0
060~089	22	21	60	19	15	1	0	0
090~119	0	0	0	0	0	0	0	0
120+	0	0	0	0	0	0	0	0

XX
Précision

XX
Adjacent

5.7.2. Statistiques de prédition

Nombre d'équipements: 4

Nombre d'entretien curatif: 33

Nombre d'observations: 2117

Précision: 30.61 %

Précision adjacente: 59.23 %

Précision-macro: 50.23 %

Sensibilité: 26.27 %

Rappel: 0.26

F1: 0.23

info@optigen.ca

Tout droit réservé. OptiGén Maintenance inc. 2021

514-704-4626 28



5.8. Prévision

Equip	Date	RLG	RF	CART	KNN	Pondéré
	Précision	27.3 %	30.7 %	25.3 %	21.6 %	30.6 %
	Préc. adjacente	46 %	54.8 %	41.9 %	64.1 %	59.2 %
081	2016/01/01	090~119	060~089	045~059	030~044	060~089
082	2016/01/01	015~029	015~029	005~014	030~044	015~029
083	2016/01/01	030~044	015~029	005~014	030~044	015~029
084	2016/01/01	030~044	060~089	030~044	030~044	045~059

Temps d'exécution: 4.59 min.



6. Annexe 1. Tableaux des interventions à moins 20% du temps moyen

6.1. Tableau des entretiens préventifs

DateHeure	Equip_ID	Comp	Ordre	Matricule	Composant	Trimestre	Tbf	IntervJour
2015-09-14 06:00:00	083	comp2_Pr	88567	125	comp2	3	1	1
2015-10-14 06:00:00	083	comp4_Pr	66315	125	comp4	4	1	1
2015-10-29 06:00:00	083	comp3_Pr	67533	96	comp3	4	1	1
2015-12-28 06:00:00	083	comp1_Pr	71904	125	comp1	4	1	1
2015-06-04 06:00:00	084	comp4_Pr	82846	125	comp4	2	3	1
2015-06-19 06:00:00	084	comp4_Pr	81829	96	comp4	2	3	2
2015-06-19 06:00:00	084	comp3_Pr	81830	96	comp3	2	3	2
2015-11-16 06:00:00	084	comp4_Pr	68816	96	comp4	4	3	1
2015-06-16 06:00:00	082	comp3_Pr	81540	96	comp3	2	4	1
2015-07-16 06:00:00	082	comp1_Pr	83918	125	comp1	3	4	1
2015-09-29 06:00:00	082	comp4_Pr	89734	112	comp4	3	4	1
2015-10-14 06:00:00	082	comp2_Pr	66311	125	comp2	4	4	1
2015-01-01 06:00:00	083	comp2_Pr	63610	112	comp2	1	4	1
2015-01-02 06:00:00	081	comp3_Pr	64446	125	comp3	1	5	2
2015-01-02 06:00:00	081	comp1_Pr	64447	96	comp1	1	5	2
2015-01-05 06:00:00	084	comp2_Pr	65538	125	comp2	1	5	1

6.2. Tableau des entretiens correctifs

DateHeure	Equip_ID	Comp	Ordre	Matricule	Composant	Trimestre	Tbf	IntervJour
2015-10-14 08:00:00	081	comp1_Co	66321	125	comp1	4	1.08	2
2015-10-14 22:00:00	081	comp4_Co	66146	112	comp4	4	1.08	2
2015-12-12 06:00:00	081	comp2_Co	70540	112	comp2	4	1.17	2
2015-12-12 06:00:00	081	comp3_Co	70547	125	comp3	4	1.17	2
2015-07-03 06:00:00	084	comp1_Co	84848	125	comp1	3	1.25	1
2015-03-25 13:00:00	082	comp1_Co	75598	96	comp1	1	1.46	1
2015-04-10 13:00:00	084	comp4_Co	76649	96	comp4	2	1.46	1
2015-06-13 13:00:00	084	comp4_Co	81126	112	comp4	2	1.46	1
2015-08-28 06:00:00	083	comp1_Co	87124	112	comp1	3	1.54	2 Double
2015-08-28 20:00:00	083	comp1_Co	87179	96	comp1	3	1.54	2 Double
2015-12-08 06:00:00	082	comp2_Co	72466	125	comp2	4	1.67	2
2015-12-08 06:00:00	082	comp3_Co	72485	125	comp3	4	1.67	2
2015-07-14 06:00:00	083	comp1_Co	83575	96	comp1	3	1.67	1
2015-10-28 01:00:00	084	comp2_Co	67299	125	comp2	4	1.67	1
2015-10-16 22:00:00	081	comp1_Co	66382	96	comp1	4	2.00	1
2015-12-11 02:00:00	081	comp3_Co	70455	125	comp3	4	2.04	1
2015-03-24 02:00:00	082	comp2_Co	75531	96	comp2	1	2.04	1



DateHeure	Equip_ID	Comp	Ordre	Matricule	Composant	Trimestre	Tbf	IntervJour
2015-10-01 06:00:00	084	comp1_Co	65778	96	comp1	4	2.08	1
2015-02-17 12:00:00	081	comp4_Co	73175	112	comp4	1	2.25	1
2015-05-07 21:00:00	081	comp3_Co	80661	96	comp3	2	2.29	1
2015-07-16 17:00:00	083	comp2_Co	83766	125	comp2	3	2.46	1
2015-07-09 02:00:00	084	comp2_Co	85519	125	comp2	3	2.54	1
2015-05-20 15:00:00	082	comp1_Co	79523	112	comp1	2	2.62	1
2015-10-06 20:00:00	084	comp3_Co	67990	125	comp3	4	2.62	1
2015-12-14 23:00:00	081	comp1_Co	70794	96	comp1	4	2.71	1
2015-03-28 06:00:00	082	comp1_Co	75782	125	comp1	1	2.71	1
2015-03-22 01:00:00	082	comp4_Co	75394	96	comp4	1	2.79	1
2015-10-04 05:00:00	084	comp1_Co	67793	125	comp1	4	2.96	1
2015-12-27 20:00:00	081	comp4_Co	71806	125	comp4	4	3.12	1
2015-05-23 02:00:00	081	comp2_Co	79758	112	comp2	2	3.29	1
2015-04-13 20:00:00	084	comp2_Co	76837	125	comp2	2	3.29	1
2015-07-06 13:00:00	084	comp1_Co	85284	112	comp1	3	3.29	1
2015-01-19 18:00:00	081	comp4_Co	64297	96	comp4	1	3.50	1
2015-05-19 17:00:00	083	comp2_Co	79333	96	comp2	2	3.58	1
2015-09-16 02:00:00	083	comp3_Co	88662	125	comp3	3	3.83	1
2015-01-01 06:00:00	081	comp1_Co	63577	96	comp1	1	4.42	1
2015-10-16 18:00:00	083	comp3_Co	66464	112	comp3	4	4.50	1
2015-12-26 06:00:00	083	comp1_Co	71631	112	comp1	4	4.62	3
2015-12-26 06:00:00	083	comp2_Co	71642	112	comp2	4	4.62	3
2015-12-26 06:00:00	083	comp3_Co	71648	125	comp3	4	4.62	3

6.3. Tableau des entretiens curatifs

DateHeure	Equip_ID	Comp	Ordre	Matricule	Composant	Trimestre	Tbf	IntervJour
2015-01-02 03:00:00	083	comp4_Cu	64375	125	comp4	1	5.88	1
2015-01-16 06:00:00	083	comp4_Cu	63994	112	comp4	1	14.12	1
2015-01-17 06:00:00	081	comp2_Cu	64060	125	comp2	1	15.00	1
2015-03-03 06:00:00	081	comp2_Cu	75916	112	comp2	1	15.00	1
2015-05-31 06:00:00	083	comp2_Cu	80297	112	comp2	2	15.00	1
2015-08-29 06:00:00	083	comp1_Cu	87226	125	comp1	3	15.00	1
2015-09-13 06:00:00	083	comp2_Cu	88367	125	comp2	3	15.00	1
2015-02-19 06:00:00	084	comp1_Cu	73345	112	comp1	1	15.00	1



7. Annexe 2. Tableau comparatif des MTBF

La colonne 'Prob_moy_diff' donne la probabilité que MTBF réelle de l'équipement X soit différente de celui de l'équipement Y compte tenu des observations (test ANOVA).

X	X_moy	X_n	X_sd	Y	Y_moy	Y_n	Y_sd	dif_XY	Prob_moy_diff
081	45.6	8	35.3	082	91.2	4	79.4	-45.6	81.3 %
081	45.6	8	35.3	083	31.4	14	17.4	14.2	78.2 %
081	45.6	8	35.3	084	52.1	7	30.9	-6.5	28.8 %
082	91.2	4	79.4	083	31.4	14	17.4	59.8	98.7 %
082	91.2	4	79.4	084	52.1	7	30.9	39.1	73.6 %
083	31.4	14	17.4	084	52.1	7	30.9	-20.7	93.8 %

BIBLIOGRAPHIQUE

- AFNOR (2010), *Maintenance - Terminologie de la maintenance, NF EN13306*, France: AFNOR, 27 p.
- AFNOR (2016). *Maintenance industrielle, fonction maintenance FD X 60-000*, France: AFNOR, 28 p.
- AFNOR (2018), *Management de projets, programmes et portefeuilles - Recommandations sur le management de projets, NF ISO 21500*, France: AFNOR, 60 p.
- Ait El C., Gharbi A., Artiba A., (2021), *Integrated Production, Maintenance and Quality Control Policy for Unreliable Manufacturing Systems under Dynamic Inspection*. International Journal of Production Economics. Volume 236. 53 p.
- Assante, D., (2016). *The Use of Cloud Computing in SMEs* , Second International Workshop on Mobile Cloud Computing systems, Management, and Security (MCSMS-2016), pp. 1207-1212
- Alarbi M., Lutfiyya H., (2018), *Sensing as a Service Middleware Architecture*, 2018 IEEE 6th International Conference on Future Internet of Things and Cloud, pp. 399-406
- Bain & Company Inc., (2018). *Cybersecurity Is the Key to Unlocking Demand in the Internet of Things*, 12 p.
- Bédard-Maltais, P.-O., (2017). *Industrie 4.0 : la nouvelle révolution industrielle*, Banque de développement du Canada, 24 p.
- Bersin J., (2014). *Frameworks and Maturity Models*, Deloitte Development, 27 p.
- Boylu Uz F., (Aout, 2016). « *Predictive Maintenance Modelling Guide R Notebook ,Azure AI Gallery* ». En ligne., < <https://gallery.azure.ai/Notebook/Predictive-Maintenance-Modelling-Guide-R-Notebook-1> >
- Blache K., (Octobre 2019). *Progress on your reliability maintenance goals begins – and ends – with your facility’s culture* . En ligne. < <https://www.accelix.com/community/reliability/progress-on-your-reliability-maintenance-goals-begins-and-ends-with-your-facilitys-culture/> >
- Blanchard M., (Octobre 2018). « *Involving Operators in Your Equipment Maintenance Plans* ». En ligne., < <https://poweredbyrx.com/resource/Involving-Operators-in-Your-Equipment-Maintenance-Plans-1882.html> >

- Blackburn-Grenon F., Abran, A., Rioux, M., Wong, T., (2021). *A team-based workshop to capture organizational knowledge for identifying AI proof-of-value projects*, IEEE engineering management review, vol. 49, no. 2, second quarter, june 2021, 15 p.
- Bosche A., Crawford D., Jackson, D., Schallehn M., Smith P., (2016). *How Providers Can Succeed in the Internet of Things*, Bain & Compagny, 12 p.
- Bosche A., Crawford D., Jackson, D., Schallehn M., Schorling C., (2018). *Unlocking Opportunities in the Internet of Things*, Bain & Compagny, 12 p.
- Boulenger (2008). *Aide-mémoire Maintenance conditionnelle*, L'usine Nouvelle, DUNOD, 147 p.
- Butler T. J. (Mai 2019). *Commercial IoT development: Agile or waterfall ? Or both?*, TechTarget – IoT Agenda. En ligne. < <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/blog/IoT-Agenda/Commercial-IoT-development-Agile-or-waterfall-Or-both> >
- Chaos Report* 2015. The Standish Group International, Inc., 13 p.
- Desai, Nisarg (Décembre 2019). *IT vs. OT for the Industrial Internet – Two Sides of the Same Coin?*, GlobalSign. En ligne, < <https://www.globalsign.com/en/blog/it-vs-ot-industrial-internet> >
- Ermine, J.-L., Moradi, M. & Brunel, S. (2012). *Une chaîne de valeur de la connaissance*. Management international / International Management / Gestión Internacional, 16, pp. 29–40.
- Foray, D. (2009). *L'économie de la connaissance*. Éditions La Découverte, 128 p.
- Forum Adopte IoT. (2017). *Faciliter l'adoption de l'internet des objets (IoT) en lien avec les technologies intelligentes (sm smart) et l'intelligence artificielle - un état de la situation*, Consortium innovation, 23 p.
- Geissbauer R., Lübben E., Schrauf S., Pillsbury S., (2018). *How industry leaders build integrated operations ecosystems to deliver end-to-end customer solutions*, pwc strategy &, 64 p.
- Gouvernement du Canada. (Juin 2016). « *Principales statistiques relatives aux petites entreprises* ». En ligne. <https://www.ic.gc.ca/eic/site/061.nsf/fra/h_03018.html>
- Groba C., Cech S., Rosenthal F., Gossling A., (2019). *Architecture of a Predictive Maintenance Framework*, Dresden University of Technology, 6 p.

- Heintz É., Heguenauer G., Marcandella E., Weber P., (2018). *La maintenance : un levier du développement durable*, Techniques de l'ingénieur, réf : AG502 V1, 22 p.
- Hétu, S., (2017), *Bilan 2005 – 2017 Gestion de la maintenance EEF*, STM, 35 p.
- Infor (Décembre 2021), *Maintenance 4.0 : amélioration de la production et de la rentabilité*.
En ligne <<https://www.infor.com/fr-fr/blog/maintenance-4-0-am%C3%A9lioration-de-la-production-et-de-la-rentabilit%C3%A9>>
- Institut de la statistique du Québec (Mai 2020), « *Les entreprises québécoises de moins de 5 employés : portrait et contribution à la dynamique des entreprises et de l'emploi* », Gouv. Québec, En ligne, <<https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/les-entreprises-quebecoises-de-moins-de-5-employes-portrait-et-contribution-a-la-dynamique-des-entreprises-et-de-lemploi>>
- Jardine A.K.S, Tsang A.H.C (2021). *Maintenance, Replacement, and Reliability Theory and Applications*, CRC Press, 412 p.
- Jain P., Pistikopoulos E.N., Mannan M.S. (2019). Process resilience analysis based data-driven maintenance optimization: Application to cooling tower operations, *Computers and Chemical Engineering* 121, pp. 27–45
- Johansen C., Mora M., Culp B., (Février 2020). « *Cisco Survey Reveals Close to Three-Fourths of IoT Projects Are Failing* ». En ligne. <<https://newsroom.cisco.com/press-release-content?articleId=1847422>>
- Khan A., Pohl M., Bosse S., Hart S., (2017). *A Holistic View of the IoT Process from Sensors to the Business Value*, Proceedings of the 2nd International Conference on Internet of Things, Big Data and Security (IoTBDS 2017), pp. 392-399
- Koi-Akrofi GY., Koi-Akrofi J., (2019). *Understanding the Characteristics, Benefits and Challenges of Agile it Project Management: A Literature Based Perspective*. International Journal of Software Engineering & Applications. 10. pp. 25-44.
- Krishnamoorthi K.S., Ram Krishnamoorthi V., Pennathur A., *A first course in quality engineering*, CRC Press, 600 p.
- Lebrun, Linda (2018). *Budget 2018, L'excellence en mobilité*, STM, 101 p.
- Lee P., (Mai 2020). « *MOD Find machine learning algorithms for your data.* ». En ligne. <<https://mod.rapidminer.com/#app>>
- Lévesque, M. M. (2014), L'approche Agile au-delà du développement logiciel : une étude descriptive des pratiques émergentes, Université du Québec à Montréal, 158 p.

Manufacturiers et exportateur du Québec (2015). *La fiabilité : Un changement pour toute l'organisation*, Manufacturiers et Exportateurs du Québec, 88 p.

Microsoft-Azur (Avril 2021), *Azure Machine Learning Algorithm and Module Reference*. En ligne <<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/machine-learning/algorithm-module-reference/module-reference>>

Marikyan D., Papagiannidis S., (Mars 2020), *Technology Acceptance Model (TAM)*, Business School, University of Bristol, En ligne. <<https://open.ncl.ac.uk/theories/1/technology-acceptance-model/>>

Ministère de l'Économie et de l'Innovation (Décembre 2018), « *Amélioration continue et résolution de problèmes* ». En ligne., <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/outils/_gestion-d'une-entreprise/production/amelioration-continue-et-resolution-de-problemes/>

Mintzberg H. (1998). *Structure et dynamique des organisations*, Les éditions d'organisation, 434 p.

Monchy, F. (2003). *Maintenance, méthode et organisation*, L'usine Nouvelle, DUNOD, 532 p.

Opara-Martins, J., Sahandi R., Tian F., (2016). *Critical analysis of vendor lock-in and its impact on cloud computing migration a business perspect perspective*, Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications, DOI 10.1186/s13677-016-0054-z, 18 p.

Ozanne C., Pasquier A. (2011). *Découvrir l'Agilité*, Colloque Agile Tour Rennes (France), 33p.

Petersson D., (Mars 2021), *Supervised learning*, TechTarget, En ligne. <<https://searchenterpriseai.techtarget.com/definition/supervised-learning>>

Ries E., (2011), *The Lean Startup: How Today's Entrepreneurs Use Continuous Innovation to Create Radically Successful Businesses*, Crown Business, 336 p.

Robertson R., Jones A. (2004). « *Pay day* », Plant Engineering and Maintenance, Vol. 28, pp. 186-204

Ropartz S., (2017). *La convergence IT/OT : un enjeu stratégique majeur pour les groupes industriels*, Deloitte Digital., En ligne. <<https://blog.deloitte.fr/convergence-itot-enjeu-strategique-majeur-groupes-industriels>>

Schleichert O., Bringmann B., Kremer H., Zablotskiy S., Köpfer D., (2017). *Predictive Maintenance, Taking pro-active measures based on advanced data analytics to predict and avoid machine failure*, Deloitte analytics institute, 20 p.

- Uhl-Bien M., Schermerhorn, J., Osborn R. N., de Billy C., (2018). *Comportement humain et organisation, 6e éd.*, Pearson ERPI, ISBN 9782761382427, 847 p.
- Sichel, D. E. (1997). *The Computer Revolution: An Economic Perspective*. The Brookings Institution, Washington, DC.
- Shmueli, B. (Septembre 2019), *Multi-Class Metrics Made Simple, Part I: Precision and Recall*. Towards data science. En ligne. <<https://towardsdatascience.com/multi-class-metrics-made-simple-part-i-precision-and-recall-9250280bddc2>>
- Stieninger, M. (2014). *Impacts on the organizational adoption of cloud computing: A reconceptualization of influencing factor*, CENTERIS 2014 - Conference on ENTERprise Information Systems, pp. 85 - 93
- STM Solution d'affaires (2005), *Solution de gestion de l'entretien des équipements du métro (EEF et EMR)*, STM, 32 p.
- Sullivan G. P., Pugh R., Melendez A. P., Hunt W. D., (2010). *Operations & Maintenance Best Practices, A Guide to Achieving Operational Efficiency*. Pacific Northwest National Laboratory pour le U.S. Departement of energy. 321 p.
- Subramanian, D. (Décembre 2019), «*A Simple Introduction to K-Nearest Neighbors Algorithm*» Towards data science. En ligne. <<https://towardsdatascience.com/a-simple-introduction-to-k-nearest-neighbors-algorithm-b3519ed98e>>
- Amron M. T., Ibrahim R., Chuprat S., (2017). *A Review on Cloud Computing Acceptance Factors*, 4th Information Systems International Conference 2017, ISICO 2017, 6-8 November 2017, Bali, Indonesia, pp. 639 – 646
- Thomas, M. (2012), Fiabilité, maintenance predictive et vibrations des machines, Presses de l'Université du Québec, 616 p.
- Trout, J. (Octobre 2019), «*Maintenance Is Still King, Maintenance Personnel Are Reluctant to Use Internet-based Maintenance* ». En ligne. <<https://www.reliableplant.com/Read/31707/predictive-maintenance-survey-2019>>
- Upasana (Février 2021), *Machine Learning Algorithms*, edureka!. En ligne <<https://www.edureka.co/blog/machine-learning-algorithms/>>
- Vadeboncoeur R. (1996). *Présentation de la démarche de nivellation de charge de travail nettoyage au CR entretien des structures*, STM, 17 p.
- Vadeboncoeur R., Fokom, F.(2002). *Procédure de suivi des interventions sur les équipements d'incendies*, STM, 28 p.

Vadeboncoeur R. (2014). *Comment obtenir des résultats d'envergure internationale grâce à la GMAO - STM*, conférence Maintenance industrielle – 5^e éditions – 2014, 31 p.

Vadeboncoeur R. (2016). *Présentation Solution Opale*, STM, 19 p.

Venkatesh V., Davis F. D., (2000). *A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies*, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), Vol. 46, No. 2, February 2000, pp. 186–204

Venkatesh V., Hillol B. (2008). *Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions*, Decision Sciences Volume 39 Number 2, May 2008, pp. 273-318

Wegner, P. (Avril 2021). *6 IoT adoption trends for 2022*, IOT analytics, En ligne. <https://iot-analytics.com/iot-adoption-trends/?utm_source=IoT+Analytics+Master+People+List&utm_campaign=b3e253bd1a-Use+Case+BLOG+2+2021&utm_medium=email&utm_term=0_3069fbcae4-b3e253bd1a-345449573>

Yiu T. (Novembre 2019), «*Understanding Random Forest* » Towards data science. En ligne. <<https://towardsdatascience.com/understanding-random-forest-58381e0602d2>>

Yihui X., Allaire J. J., Golemund G. (2018). *R Markdown: The Definitive Guide*, Chapman and Hall/CRC, 304 p.