

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 OPTIMISATION DE LA GESTION DES ACTIFS PHYSIQUES PAR LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE HÉBERGÉE DANS L'INFONUAGE : ÉTAT DES LIEUX.....	11
1.1 Synthèse des meilleures pratiques en gestion des actifs physiques (PAS 55)	11
1.1.1 Notion d'actifs physiques	12
1.1.2 La gestion des actifs physiques.....	13
1.1.2.1 Les différentes dimensions conjointes de la gestion des actifs physiques.....	14
1.1.2.2 Le système de gestion des actifs physiques	17
1.1.2.2.1 La politique	18
1.1.2.2.2 La stratégie.....	18
1.1.2.2.3 Les objectifs	19
1.1.2.2.4 La planification	19
1.1.2.2.5 Les facilitateurs et les contrôles.....	20
1.1.2.2.6 La mise en œuvre de la planification	20
1.1.2.2.7 L'évaluation et l'amélioration de la performance.....	23
1.1.2.2.8 La révision de la gestion	24
1.2 Un nouveau concept de maintenance pour les actifs physiques intelligents	25
1.3 L'impact de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques.....	33
1.3.1 Sur le plan de la conception des actifs physiques	34
1.3.2 Sur le plan de la production	35
1.3.3 Sur le plan opérationnel	36
1.3.4 Sur le plan logistique et de maintenance.....	37
1.3.5 Sur le plan du cycle de vie de l'actif.....	40
1.4 Problématique et Hypothèses.....	42
1.5 Méthodologie d'approche de solution	49
CHAPITRE 2 CADRAGE CONCEPTUEL DANS L'ADOPTION D'UNE MAINTENANCE PRÉDICTIVE HÉBERGÉE DANS L'INFONUAGE	55
2.1 Évolution des différents types de maintenance.....	55
2.1.1 La maintenance réactive ou la maintenance corrective	58
2.1.2 La maintenance préventive systématique	60
2.1.3 La maintenance préventive conditionnelle	61
2.1.4 La maintenance prévisionnelle ou prédictive	63
2.1.5 La maintenance proactive	64
2.1.6 La maintenance basée sur la fiabilité (MBF).....	65
2.1.7 La maintenance productive totale (TPM)	66

2.1.8	L'e-maintenance	67
2.1.9	La maintenance hébergée dans un environnement infonuagique	67
2.1.10	L'auto-maintenance	68
2.1.11	Autres types de maintenance	69
2.2	Les technologies et les applications industrielles de la maintenance prédictive	70
2.2.1	Les technologies de maintenance prédictive.....	71
2.2.1.1	La thermographie infrarouge	71
2.2.1.2	La détection par ultrasons	72
2.2.1.3	L'analyse des huiles	75
2.2.1.4	L'analyse vibratoire	76
2.2.1.5	Autres technologies de maintenance prédictive.....	77
2.2.2	Corrélation entre deux ou plusieurs technologies de maintenance prédictive: Aspect multidimensionnel	78
2.3	Cas particulier de la maintenance prédictive biomédicale et hospitalière	80
2.4	La GMAO: Récapitulation des fonctionnalités et état de l'existant	85
2.4.1	Description et importance de la GMAO	85
2.4.2	Récapitulation des fonctionnalités des GMAO.....	87
2.4.3	Apports de la maintenance prédictive infonuagique aux progiciels de GMAO	88
2.5	Nécessité de mesurer la performance de la fonction maintenance au sein de l'entreprise	91
2.6	Description de la Solution //m ⁴ de Matricis Informatique	93
2.7	Justifier et vendre un choix de politique et de stratégie de maintenance.....	98

CHAPITRE 3	ÉLABORATION DE LA TROUSSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE POUR FACILITER L'ADOPTION D'UNE MAINTENANCE PRÉDICTIVE INFONUAGIQUE.....	105
3.1	Critères de qualification d'une entreprise pour l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique	106
3.2	Niveau de criticité d'un actif et de ses composants éligibles à la maintenance prédictive infonuagique	107
3.2.1	Criticité point de vue production	108
3.2.2	Criticité point de vue maintenance	109
3.2.3	Criticité point de vue sécurité et environnement	109
3.2.4	Niveau de criticité selon l'âge de l'actif	110
3.2.5	Classification hiérarchique du niveau de criticité des actifs ou de leurs composants.....	110
3.3	Arbre décisionnel du choix d'une politique de maintenance prédictive infonuagique pour le composant ou le module d'un actif critique	111
3.4	Aspect technique de la fonction maintenance- Gestion technique des parcs d'équipements	114
3.5	Les processus de maintenance	119
3.6	Aspect économique de la fonction maintenance.....	120
3.7	Aspect sécurité et impact environnemental de la fonction maintenance	121

3.8	Description de l'approche coût-efficacité et coût-avantages (ou coût-performance) de la fonction maintenance	122
3.9	Référentiel multicritère technico-économique.....	123
CHAPITRE 4 ÉVALUATION DE LA TROUSSE D'OPPORTUNITÉS TECHNICO-ÉCONOMIQUES DE L'ADOPTION DE LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE INFONUAGIQUE.....		
		131
4.1	Compréhension des enjeux de l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique pour les entreprises.	132
4.2	Analyse des outils d'explication et d'évaluation des avantages de l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique	136
4.3	Adéquation entre problème d'adoption et toute solution offrant la maintenance prédictive infonuagique	139
4.4	Justification d'implantation de la maintenance prédictive infonuagique	141
4.5	Quelques techniques de vente pour faciliter la vente d'une solution offrant une maintenance prédictive infonuagique.	145
4.6	Étude du Marché cible pouvant bénéficier de la maintenance prédictive infonuagique	149
	4.6.1 Les concepts utiles de l'étude du marché	149
	4.6.2 Cas d'une solution offrant la maintenance prédictive infonuagique : //m ⁴ de Matricis Informatique corporation	152
4.7	Grille d'évaluation multicritère.....	157
4.8	Limites et recherches futures	158
CONCLUSION.....		165
ANNEXE I	LES PROGICIELS DE GMAO : FONCTIONNALITÉS ET LISTE DES PLUS IMPORTANTS VENDEURS	171
ANNEXE II	PROPOSITION DE CHEMIN DÉCISIONNEL POUR L'ADOPTION D'UNE MAINTENANCE PRÉDICTIVE INFONUAGIQUE PAR UNE ENTREPRISE QUALIFIÉE.....	173
ANNEXE III	ÉLÉMENTS D'ÉTUDE DE MARCHÉ POUR LA SOLUTION //m ⁴ DE MATRICIS INFORMATIQUE	183
ANNEXE IV	RÉCAPITULATION DES OUTILS PROPOSÉS POUR RÉMÉDIER AU PROBLÈME DE NON-ADOPTION DE LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE INFONUAGIQUE PAR LES ENTREPRISES.....	185
ANNEXE V	TABLEAUX D'ÉVALUATION MULTICRITÈRE DE LA TROUSSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE CONCUE.....	187
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		191

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Exemples de quelques technologies de maintenance prédictive et leurs applications	80
Tableau 4.1 Utilisation des progiciels de GMAO par les entreprises au Québec.....	154

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Méthodologie du système de gestion infonuagique des pronostics de défaillances et de l'état de santé des actifs.....	32
Figure 1.2	Boîte à outils de l'agent de surveillance de l'Intelligent Maintenance System (IMS).....	33
Figure 2.1	Aperçu des fonctionnalités de la Solution //m ⁴	56
Figure 2.2	Évolution de la maintenance.....	56
Figure 2.3	Courbe en baignoire.....	57
Figure 2.4	Les formes courantes de maintenance.....	70
Figure 2.5	Principe des applications d'ultrasons.....	74
Figure 2.6	Synoptique de la maintenance prédictive.....	83
Figure 2.7	Description du déclenchement des processus de maintenance.....	97
Figure 2.8	Interopérabilité des fonctionnalités de //m ⁴ avec d'autres interfaces de l'entreprise.....	97
Figure 2.9	Nécessité de trouver un équilibre entre correctif et préventif.....	101
Figure 3.1	Schéma global de la gestion technique de parcs d'équipements.....	116
Figure 3.2	Schéma concis des processus de maintenance.....	120
Figure 4.1	Schéma des concepts d'une étude de marché.....	150
Figure 4.2	Les six étapes de l'étude de marché.....	151

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

<i>AFIM</i>	Association française des ingénieurs et responsables de maintenance
<i>AFNOR</i>	Association française de normalisation
<i>AMDEC</i>	Analyse des modes de défaillances de leurs effets et leur criticité
<i>Big Data</i>	Données massives
<i>BT</i>	Bon de travaux
<i>Benchmarking</i>	Analyse comparative, balisage, étalonnage ou parangonnage (Stevenson, Benetti et Youssef, 2012)
<i>BSI</i>	British Standards Institute
<i>Cloud computing</i>	Modèle permettant sur demande et en libre-service, l'accès commode et omniprésent via un réseau de télécommunications, à des ressources informatiques partagées configurables (Mell et Grance, 2011).
<i>CMMS</i>	Computerized Maintenance Management System
<i>CND</i>	Contrôles non destructifs
<i>CRC</i>	Comité de la réglementation comptable (française)
<i>E-maintenance</i>	Gestion de la maintenance par intégration des technologies de l'information et de la communication (TIC).
<i>GMAO</i>	Gestion de la maintenance assistée par ordinateur
<i>HAZOP</i>	Hazard and Operability Studies
<i>HM</i>	Prognostic and Health Management (gestion des pronostics de défaillances et de l'état de santé des actifs physiques)
<i>IAM</i>	Institute of Asset Management
<i>IMS</i>	Intelligent Maintenance System

XX

<i>Info nuage</i>	Infonuagique ou Cloud computing
<i>KPI</i>	Key Performance Indicator
<i>Maintenance prédictive</i>	Maintenance prévisionnelle
<i>MBF</i>	Maintenance basée sur la fiabilité
<i>MEQ</i>	Manufacturiers et exportateurs du Québec
<i>Normes ISO 13381-1:2004</i>	Surveillance et diagnostic des machines Pronostic-Partie 1 : lignes directrices générales.
<i>OMS</i>	Organisation mondiale de la santé
<i>OT</i>	Ordre de travaux
<i>PAS 55</i>	Publicly Available Specification. Guide de références en gestion des actifs physiques conçu par des experts industriels de l'Institute of Asset Management (IAM) avec la collaboration du British Standards Institute (BSI). La première version est parue en 2004 et la deuxième, le PAS 55-2 en 2008. Certifié ISO 55000, ISO 55001 et ISO 55002 en Janvier 2014.
<i>PGI</i>	Progiciels de gestion intégrée
<i>Refabrication</i>	Processus qui consiste à fabriquer à nouveau
<i>SaaS</i>	Software as a service
<i>SKF</i>	Nom d'une firme suédoise, leader mondial dans la fabrication et de services divers pour roulements, ensemble de roulements et autres produits
<i>SST</i>	Santé et sécurité au travail
<i>Test de Megger</i>	Control non destructif permettant de vérifier la résistance d'isolation électrique.

TIC Technologies de l'information et de la communication

Watchdog agent toolbox Boîte à outils de l'agent de surveillance.

INTRODUCTION

Les actifs physiques quelle que soit leur diversité technologique et leur domaine d'exploitation sont assujettis à produire une valeur ajoutée optimale avec une réduction maximale des coûts durant leur cycle de vie. Tout actif dans sa conception a une performance théorique intrinsèque (une performance conceptuelle) tandis que les données pratiques d'exploitation lui confèrent une performance opérationnelle. L'objectif principal des gestionnaires des entreprises est de réduire au maximum l'écart entre performance opérationnelle et performance conceptuelle afin de rallonger la vie utile de l'actif et de le rendre plus productif. Une telle mission est loin d'être une tâche aisée car contrairement aux données de conception, l'exploitation des actifs physiques connaît l'influence de plusieurs facteurs tels que les conditions environnementales, la cadence d'exploitation, l'exigence en qualité et en quantité, mais surtout de l'inclémence des lois et des normes strictes dont les gestionnaires ne peuvent faire fi. C'est un grand défi pour ces gestionnaires qui doivent limiter les coûts de gestion en adoptant une solution de gestion performante des actifs pour assurer la prospérité et la compétitivité de leurs entreprises.

Pendant longtemps, la gestion des actifs était confondue à la gestion de la maintenance. Mais l'avènement du PAS 55 en 2008, un chef d'œuvre de Institute of Asset Management (IAM) et la British Standard Institute (BSI), a permis de dresser les meilleures pratiques en matière de gestion des actifs physiques. Bien gérer les actifs physiques devient alors synonyme d'intégrer toutes les composantes de l'entreprise suivant une vue holistique. Plus particulièrement, la fonction maintenance est une composante de l'entreprise qui joue un rôle crucial dans une gestion réussie en dictant la performance des actifs physiques. Il est donc primordial d'appliquer une politique de maintenance appropriée aux parcs d'actifs afin de permettre aux actifs de restituer une performance optimale.

Dans la recherche d'une amélioration de la performance des actifs physiques, les technologies de l'information en l'occurrence les progiciels de GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur) ont connu leur entrée historique depuis des décennies

dans la gestion de la maintenance. Mais malgré la richesse et l'amélioration continue des fonctionnalités de ces progiciels de gestion de maintenance, ils sont sous-exploités et présentent des insuffisances qui expliquent leur rigidité après installation. Plus particulièrement, leur performance est affectée par son incohérence temporelle avec la maintenance prédictive traditionnelle (maintenance prévisionnelle traditionnelle), les temps de GMAO s'exprimant en cycles de maintenance (mois, jour, année) tandis que ceux de maintenance prédictive s'expriment en temps réel (secondes). Certes, les progiciels de GMAO sont entre autres, de formidables outils de gestion d'historiques des actifs ainsi que la planification des tâches de maintenance préventive systématique. Cependant, ils sont de piètres outils de prédiction de défaillances (Galar et al., 2012). En outre, leur coût d'acquisition ainsi que leur coût de maintenance parfois énormes rendent peu enviable leur remplacement.

Par ailleurs, la complexité technologique sans cesse croissante des actifs physiques ne met pas seulement à l'épreuve les progiciels de GMAO, elle revendique une maintenance analytique plus intelligente. En effet, elle défie la maintenance prédictive traditionnelle et exige désormais une nouvelle forme de maintenance intelligente digne de contrer ces nouveaux actifs intelligents contemporains. Autrement dit, malgré les nombreux avantages que présente la maintenance prédictive traditionnelle comparativement aux autres formes courantes de maintenance (maintenance réactive et préventive systématique), elle présente en dehors de son incohérence temporelle avec les GMAO, plusieurs autres insuffisances. Selon Galar et al. (2012), ces insuffisances s'expriment par :

- les infrastructures informatiques dispendieuses,
- la non-prise en compte de l'âge des actifs dans les pronostics de défaillance,
- la non-prise en compte des données de comparaison d'actif-à-actif,
- la nécessité de temps et de ressources importants dans la conception, l'implantation, l'exploitation et la réalisation des objectifs de la maintenance prédictive.

Heureusement, l'évolution technologique sans cesse croissante de nos jours ne met pas seulement au défi les GMAO et la maintenance prédictive traditionnelle. Elle permet

également au monde industriel de profiter : des capteurs performants de moins en moins chers, des intégrations informatiques plus accessibles, des solutions de gestion de processus légères, et surtout de la puissance des avantages de l'infonuagique. En ce sens, les données de gestion autrefois disparates géographiquement sur plusieurs sites d'une entreprise peuvent être unifiées grâce aux opportunités offertes par l'infonuagique pour optimiser la gestion des actifs physiques (Laut et al., 2013). En d'autres termes, en réponse aux actifs de plus en plus intelligents, une maintenance intelligente dite maintenance infonuagique est née pour répondre aux insuffisances de la maintenance prédictive traditionnelle ainsi que celles des progiciels de GMAO et permettre de mieux gérer les actifs contemporains afin d'optimiser leur performance et de la pérenniser dans le temps.

En outre, cette nouvelle forme de maintenance contemporaine facilite l'interopérabilité entre maintenance prédictive et progiciels de GMAO. Elle a un impact significatif sur les composantes de gestion des actifs physiques en optimisant la sécurité, les coûts, les temps et les ressources. L'adoption d'une telle maintenance novatrice permettrait donc de toute évidence d'améliorer significativement la gestion des actifs physiques. Intuitivement, selon Galar et al. (2012), combiner la gestion des GMAO avec celle de la maintenance prédictive infonuagique qui sont tous deux les répertoires de l'entreprise où le plus grand volume d'informations et de technologies de maintenance sont le plus déployées, engendrerait des avantages exponentiels sur la performance des actifs physiques.

Toutefois, malgré les opportunités technico-économiques notables que présente la maintenance prédictive infonuagique, les gestionnaires d'entreprises sont très peu nombreux à vouloir l'adopter et se cramponnent sur les formes courantes de maintenance corrective et préventive systématique dont la gestion de maintenance ne doit cependant pas faire fi. La conséquence d'une telle attitude est la difficulté que rencontrent les concepteurs de solution offrant une telle forme de maintenance à promouvoir et à vendre leur produit et service. L'analyse de cette double réalité crée une situation embarrassante qui suscite des interrogations.

Ainsi l'on pourrait se demander si cette double réalité est sous-tendue par le manque d'informations des protagonistes (concepteurs de solutions et entreprises clientes) sur la maintenance prédictive infonuagique et l'impact de son adoption sur la gestion des actifs physiques. Ou encore, les concepteurs manquent-ils d'outils adéquats pouvant leur permettre de mieux promouvoir leur produit ou service? Ou alors, les entreprises ont-elles un niveau de maturité en maintenance ne leur permettant pas d'adopter une telle nouvelle forme de maintenance évoluée?

Les réponses à ces questions pertinentes et très riches décrivent l'objet de ce mémoire qui est d'analyser l'impact de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques pour concevoir une trousse d'analyses d'opportunités technico-économiques pouvant éclairer :

- primo, les concepteurs de solutions offrant la maintenance prédictive infonuagique; (telle que par exemple la solution //m⁴ de Matricis Informatique Inc.), afin de mieux promouvoir et vendre leur produit;
- secundo, les gestionnaires d'entreprises dans l'adoption de cette nouvelle politique de maintenance.

Ainsi, il est nécessaire de tenir compte dans la conception d'une telle trousse des outils devant impliquer les deux protagonistes. D'ailleurs des travaux menés par Bo et al. (2012), il ressort que l'aspect coût-bénéfice et les défis d'implantation des technologies de maintenance prédictive passent par une solution d'intégration de gestion des actifs qui interpelle aussi bien les concepteurs que les utilisateurs de ces technologies.

De toute évidence, la conception de solutions offrant la maintenance prédictive infonuagique paraît justifiée. En effet, selon Tsang et al. (2006), la demande forte de de la clientèle des industries d'actifs complexes de nos jours se porte sur leur souhait d'avoir :

- une augmentation de la disponibilité de leurs actifs,
- leur sécurité opérationnelle,
- leur durabilité,

- une réduction des coûts d'exploitation et de maintenance de leurs actifs (durant leur cycle de vie),
- une facilité de soutien opérationnel en tout temps et en tout lieu.

Il est bien entendu que vu la densité des concepts qu'un tel projet implique, il sera absolument erroné de considérer une telle trousse comme étant une clé magique permettant de solutionner entièrement une telle situation. Notre trousse conçue n'est donc qu'une approche de solutions composée de propositions d'outils nécessaires mais non limitatifs et dont l'exploitation exige d'autres considérations des protagonistes (concepteurs et leurs clients).

En réalité, de façon plus explicite, le but de ce mémoire est de munir tout concepteur, tel que la société Matricis informatique Inc offrant une solution pouvant permettre d'adopter la maintenance prédictive infonuagique, d'outils technico-économiques de maintenance afin de :

- permettre de mieux comprendre les avantages de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques et les GMAO,
- mieux comprendre les raisons de sa non-adoption par les entreprises,
- mieux présenter et mieux expliquer aux entreprises les avantages de l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique (adéquation entre compréhension des avantages et raisons de non-adoption),
- pouvoir justifier l'implantation de la maintenance prédictive infonuagique pour les entreprises et de pouvoir mesurer son impact sur les performances de la fonction maintenance.
- pouvoir promouvoir et vendre leur produit et service aux entreprises ciblées comme clientèle potentielle.

Pour atteindre ces buts dans ce mémoire qui est de type recherche-action ou recherche-intervention (versus un mémoire de recherche de type classique), nous allons adopter la démarche générale suivante.

Tout d'abord nous allons dans le premier chapitre faire un état des lieux à travers une revue de littérature pertinente sur l'optimisation de la gestion des actifs physiques par la maintenance prédictive hébergée dans l'infonuagique. Cette revue de l'impact de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques passera par une synthèse des meilleures pratiques en gestion des actifs physiques selon le PAS 55 (Publicly Available Specification) de l'IAM et BSI afin de résumer la notion d'actifs physiques, le système d'actifs physiques ainsi que les recommandations du PAS 55 en matière de gestion des actifs physiques. De façon succincte ces recommandations indiquent une gestion intégrant toutes les composantes de l'entreprise suivant une vue holistique et centrée sur la prise en compte du cycle de vie complet des actifs depuis leur conception jusqu'à leur mise au rebut, afin de réaliser une performance de gestion optimisée et pérennisée.

De plus, dans le premier chapitre nous allons explorer à travers la littérature les raisons de l'essor de ce nouveau concept de maintenance prédictive infonuagique qui est né en réponse aux actifs physiques de plus en plus intelligents et dont l'impact notable sur la gestion de ces derniers ne peut être foulé aux pieds.

Le dernier point du premier chapitre nous permettra de définir la problématique ainsi que les hypothèses qui découlent de notre revue de littérature. Enfin, nous allons décrire la méthodologie que nous allons adopter pour des tentatives de solutions dans la suite du mémoire.

Dans le deuxième chapitre, nous allons analyser les concepts utiles dans l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique. C'est un cadrage conceptuel qui nous permettra d'analyser l'évolution de la maintenance au fil des ans en mettant en exergue la maintenance prédictive infonuagique dans sa comparaison aux autres formes de maintenance. Aussi, les technologies de maintenance prédictive seront examinées.

Nous analyserons également le cas particulier de l'application de la maintenance prédictive infonuagique dans le milieu biomédical et hospitalier en prenant pour exemple l'utilisation

des données opérationnelles et de surveillance d'état des tomodensitomètres (ou scanners à rayon-x) pour réaliser des pronostics de défaillances. Avec ces pronostics de défaillances, les tâches de maintenance seront exécutées juste-à-temps aux dépens d'une exécution de tâches de maintenance systématique suivant l'usage ou un temps calendaire. Nous nous inspirerons des inventions de Breunissen, Hardiman et Shubha (2005) dont les schémas précis ont été décrits pour montrer comment des données disponibles en temps réel sur les équipements médicaux peuvent être collectées et aider à l'adoption d'une politique de maintenance prédictive.

Ensuite, nous allons récapituler les fonctionnalités des GMAO et nous ferons l'état de l'existant au niveau des concepteurs de ces progiciels. Nous allons également analyser l'apport de la maintenance prédictive infonuagique aux progiciels de GMAO.

Mais, puisque la performance de la fonction maintenance est celle qui dicte la performance de l'entreprise et qu'aucune amélioration de performance ne peut être possible sans la mesure de cette dernière, nous allons examiner la nécessité de mesurer la performance de la fonction maintenance au sein de l'entreprise. Une description d'un exemple de solution offrant la maintenance prédictive infonuagique (la Solution //m4 de Matricis Informatique) sera faite. Enfin, étant entendu que l'objectif final d'adoption de la maintenance prédictive infonuagique n'aurait pas été atteint seulement par la compréhension de son impact sur la gestion des actifs, nous allons explorer comment justifier et vendre un choix de politique et de stratégie de maintenance.

Une fois le cadrage conceptuel achevé, le troisième chapitre portera sur l'élaboration de la trousse technico-économique pour faciliter l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique. Guidés par le principe d'appliquer la maintenance prédictive infonuagique aux composants ou modules critiques d'un actif critique patrimoine d'une entreprise qualifiée à l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique, nous serons conduits à analyser les critères de qualification d'une entreprise pour l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique ainsi que le niveau de criticité d'un actif et de ses composants éligibles à la

maintenance prédictive infonuagique. Nous proposerons un arbre décisionnel du choix d'une politique de maintenance prédictive infonuagique pour les composants ou les modules d'un actif critique en nous inspirant de Monchy et Vernier (2010) et Menzel, Schönherr et Tai (2013).

L'analyse technico-économique de la fonction maintenance au sein de l'entreprise nous imposera d'examiner les aspects techniques et économiques de la fonction maintenance. Un schéma de gestion technique des parcs d'équipements sera proposé avec une mise en évidence de la puissance de l'inventaire au cœur de l'interaction des composantes de gestion technique tout en décrivant les attentes techniques de la fonction maintenance. Puisque l'arme de la maintenance prédictive infonuagique est d'agir sur les processus de maintenance plutôt que sur les opérations de maintenance, nous proposerons un schéma décrivant les processus de maintenance.

Un autre volet des attentes de la maintenance est l'aspect économique traduit essentiellement par une minimisation des coûts et une recherche maximale de profits. Mais la performance de la fonction maintenance ne pouvant être réduite seulement aux attentes techniques et économiques, nous allons aborder son volet le plus important qu'est la sécurité et la protection de l'environnement.

Une combinaison des attentes techniques et économiques ainsi que celles sur le plan de la sécurité et la protection de l'environnement nous amènera à analyser les approches coût-efficacité et coût-bénéfice c'est-à-dire une approche coût-performance de la fonction maintenance.

Enfin, pour permettre l'évaluation, le suivi et éventuellement l'amélioration de la performance de la fonction maintenance, nous proposerons un référentiel multicritère technico-économique fait d'indicateurs de maintenance en nous inspirant de l'Association française de normalisation Association française de normalisation (1995) et Manufacturiers et Exportateurs du Québec (2007). Ces indicateurs de maintenance sont distribués dans un

tableau portant en lignes les facteurs sécurité, coût, temps et ressources et en colonne les composantes de gestion de l'entreprise telles que la production, la sécurité, la GMAO, la logistique et les pièces de rechange, le volet opérationnel, le design ou la conception etc. Des remarques seront faites pour souligner que ces indicateurs de maintenance quand bien même sélectionnés suivant des références bibliographiques pertinentes telles que l'Association française de normalisation (AFNOR), ne peuvent être considérés comme ni exhaustifs ni limitatifs. Par ailleurs la redondance apparente de certains d'entre eux d'une cellule à une autre de la matrice ne peut être synonyme de la confusion de leurs significations qui varient suivant le contexte dans lequel ils sont décrits.

Dans le dernier chapitre de ce mémoire, nous ferons l'évaluation de la trousse technico-économique en examinant son impact sur la résolution des questionnements et des hypothèses de départ. L'objectif de cette évaluation est de pondérer certains critères issus des questionnements et hypothèses de départ et stipulés comme suit :

- la compréhension des enjeux d'adoption de la maintenance prédictive infonuagique,
- l'analyse des outils d'explication et d'évaluation des avantages de l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique,
- l'adéquation entre problèmes d'adoption et toute solution offrant la maintenance prédictive infonuagique,
- justification d'implantation de la maintenance prédictive infonuagique,
- une récapitulation de cette évaluation sera résumée dans une grille d'évaluation.

En outre, la trousse technico-économique ne pourrait être bouclée sans avoir d'une part, une idée sur le marché cible pouvant bénéficier d'une politique de maintenance prédictive infonuagique, d'autre part, des techniques pouvant aider à la promotion et la vente à la clientèle cible. C'est pourquoi nous allons analyser les concepts entrant en ligne de compte pour une étude de marché ainsi que quelques techniques de vente utiles dans une démarche commerciale.

Au final, comme toute activité de recherche, nous ne saurons terminer sans analyser les limites de notre démarche ainsi que les différents aspects de celle-ci pouvant servir pour des recherches futures d'autant plus que le concept aussi bien de maintenance prédictive infonuagique que de sa promotion auprès des entreprises est assez nouveau et que la littérature qui y est consacrée à ce jour reste assez maigre.

CHAPITRE 1

OPTIMISATION DE LA GESTION DES ACTIFS PHYSIQUES PAR LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE HÉBERGÉE DANS L'INFONUAGE: ÉTAT DES LIEUX

Dans ce premier chapitre consacré à la revue de littérature, nous faisons l'état des lieux en matière d'optimisation de la gestion des actifs physiques par la maintenance prédictive infonuagique. Nous ne saurons aborder l'impact de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques sans faire une synthèse des meilleures pratiques en gestion des actifs physiques. Ensuite, à travers la littérature, nous verrons que la maintenance prédictive infonuagique est un nouveau concept de maintenance intelligente recommandé pour les actifs physiques intelligents.

Il est cependant important de noter pour ce premier chapitre, que le concept de maintenance prédictive infonuagique étant très récent, très peu de littératures y sont pour le moment consacrées. Face à une littérature pauvre sur le sujet, nous avons défini les avantages d'une telle forme de maintenance novatrice comme étant une combinaison entre les avantages de la maintenance prédictive que nous avons désignée par maintenance prédictive traditionnelle et ceux de l'infonuagique.

1.1 Synthèse des meilleures pratiques en gestion des actifs physiques (PAS 55)

Pendant longtemps, la gestion des actifs physique a été considérée comme étant l'ensemble des activités destinées à l'utilisation et à la maintenance des équipements (Qikai et al., 2011). Mais avec la complexité grandissante des différents systèmes des entreprises qui affectent les performances des actifs, le PAS 55-2 a introduit un nouveau concept de gestion des actifs physiques, qui ne se focalise pas uniquement sur les tâches de maintenance des équipements, mais sur une considération holistique intégrant toutes les composantes de l'entreprise.

Le PAS 55-2 peut être considéré comme une anatomie de la gestion des actifs physiques et il est reconnu mondialement par les meilleures pratiques qu'il recommande.

Dans cette première partie du présent chapitre, nous nous sommes appuyés majoritairement sur les fondements du PAS 55-2 pour faire la synthèse des bonnes pratiques en matière de gestion des actifs physiques. Avant de décrire la gestion des actifs selon le PAS 55-2, nous allons examiner la notion d'actifs physiques.

1.1.1 Notion d'actifs physiques

La notion d'actif est très large et s'inscrit dans un contexte économique et financier. Le dictionnaire LAROUSSE le définit comme étant «Ce que possède une entreprise». Selon l'article 211-1 du comité de la réglementation comptable français COMPTABLE-CRC (2005), «un actif est un élément identifiable du patrimoine ayant une valeur économique positive pour l'entité, c'est-à-dire un élément générant une ressource que l'entité contrôle du fait d'événements passés et dont elle attend des avantages économiques futurs.» Selon toujours le COMPTABLE-CRC (2005), il existe quatre catégories d'actifs que nous reprenons comme suit :

- *les actifs dits tangibles ou d'immobilisation corporelle ou encore actif physique* de type productif ou destiné à fournir des biens et services;
- *les actifs intangibles ou d'immobilisations incorporelles*, tels que par exemple, les brevets, les dessins, les bases de données, le savoir-faire, les licences, ou même l'image de l'entreprise, etc.;
- *les stocks constitués*; et
- «*les charges constatées d'avance* qui sont des actifs qui correspondent à des achats de biens ou de services dont la fourniture ou la prestation interviendra ultérieurement.»

Dans ce chapitre et d'ailleurs dans tout ce mémoire, seuls seront considérés les actifs physiques qui regroupent les bâtiments, les machines industrielles, les infrastructures de transport, les parcs de véhicules, les parcs d'équipements médicaux, les parcs d'équipements informatiques, etc. Tous ces actifs représentent des investissements importants devant produire une valeur ajoutée. Ils doivent conserver le maximum de leur performance

opérationnelle, quel que soient leur usage, et leur environnement d'exploitation sans faillir aux normes et réglementations auxquelles ils sont assujettis. Ce sont des enjeux essentiels qui exigent une bonne gestion des actifs physiques.

1.1.2 La gestion des actifs physiques

De nos jours, avec les entreprises devenant de plus en plus concurrentielles et complexes, le but permanent de toute entreprise est de rester compétitif en offrant à une clientèle variée des produits ou des services de qualité avec un budget réduit malgré le poids des normes, des lois, des réglementations et le développement technologique rapide. C'est l'essence même de la notion de gestion des actifs.

Le PAS 55-2 définit la gestion des actifs ou gestion de portefeuille, comme étant des activités, et des pratiques systématiques et coordonnées à travers lesquelles les entreprises gèrent de façon substantielle et optimale leurs actifs et leurs systèmes d'actifs, leurs performances associées, les risques et les coûts tout au long de leur cycle de vie, au respect du plan stratégique de l'entreprise (Institute of Asset Management. et BSI, 2008). De cette définition, il ressort que la gestion des actifs physiques ne peut être dissociée de la gestion des autres types d'actifs (intangibles, stock, humains, financiers, informationnels, et autres) qui lui sont intimement liés. L'Institute of Asset Management. et BSI (2008) stipulent que gérer les actifs revient à construire et consolider une vue holistique intégrant plusieurs dimensions: systématique, systémique, optimale, durable, et fondée sur le risque.

En effet, de la conception, puis durant son cycle de vie, à sa mise au rebut, la gestion de tout actif est complexe et exige un processus rigoureux impliquant la collaboration de plusieurs ressources aussi bien du domaine économique, social, politique, technologique et environnemental. Gérer des actifs physiques consiste à trouver une politique appropriée qui leur permettrait de conserver leur performance au niveau optimal tout en minimisant les coûts liés à leur cycle de vie. Même si cet aspect économique semble dominant, il est tout de suite rattrapé par les lois et normes, la santé et sécurité au travail, la protection de

l'environnement sans oublier les efforts de maîtrise de la technologie qui évolue aussi rapidement.

La notion de performance combine une efficacité et une efficience pérennisée ou durable. L'efficacité (au niveau de l'entreprise) se résume par l'atteinte des objectifs de l'entreprise prédéfinis par les différentes parties prenantes de l'organisation. La notion d'efficacité intègre également l'aspect qualitatif et quantitatif des produits ou des services. L'efficience quant à elle, se rapporte à l'efficacité atteinte à moindre coût. Ces définitions de concepts sont transposables au niveau d'un actif ou système d'actifs. Le prochain paragraphe nous permettra de passer en revue les différentes dimensions à considérer comme principes de base dans la gestion des actifs physiques. Précisons que ces dimensions sont inspirées du PAS 55-2.

1.1.2.1 Les différentes dimensions conjointes de la gestion des actifs physiques

- *L'approche systématique*: dans cette approche, tout actif ou système d'actifs est modélisé comme un système, qui d'après William Stevenson, Claudio et Youssef (2012), est un ensemble de composantes d'intrants, d'extrants, avec une boucle de rétroaction, le tout baignant dans un environnement dans lequel il évolue et avec lequel il interagit. ((Stevenson, Benetti et Youssef, 2012), p. 9). C'est donc une approche qui suit une logique rigoureuse et consistante étudiant l'objet dans la manière dont il interagit sur son environnement. En ce sens, l'approche systémique est une considération de l'interaction entre chaque actif et les composantes de son environnement. Ses paramètres de performance ne doivent donc pas être analysés de façon isolée, et devront prendre en compte les paramètres de performance de tout le système auquel il appartient en associant coûts, risques, et qualité.
- *L'aspect optimal* n'est qu'une pondération des différentes données de gestion des actifs définies sous forme de coûts, de risque et de performance mesurables pour tout actif physique durant son cycle de vie.

- *La durabilité* s'inscrit dans la pérennisation des actions entreprises et des résultats optimaux obtenus dans la gestion des actifs au regard de la politique et la stratégie de l'entreprise. Elle s'exprime également par la recherche durable d'une stratégie de gestion des actifs qui conserve au mieux les performances attendues de tout actif productif. Elle représente une projection dans le temps de la maturité de gestion acquise à long terme par l'entreprise.
- *La gestion des risques* n'est qu'une composante certaine, liée naturellement et par principe de définition de l'actif physique qui doit être productif ou fournir des biens et services. En d'autres thèmes, tout actif lorsqu'il est productif ou destiné à fournir des biens ou services est assujéti de façon certaine au couple performance-risque. Une prise de conscience est donc nécessaire pour que les risques soient identifiés, que leur quantité et leur qualité soient définies afin que des actions conséquentes soient entreprises pour les contrôler et les maîtriser. Les risques proviendront par exemple des opérations de production et d'entretien ou même de nouveaux projets tels que les travaux neufs. Ils intègrent les risques d'investissement, mais, ils touchent notamment la santé et sécurité au travail et la protection de l'environnement. Une gestion intégrant ces risques est donc nécessaire et des ressources doivent y être consacrées en tenant compte du rapport coût-avantages. D'ailleurs, l'Institut of Asset Management. et BSI (2008) énoncent que l'intégration du risque dans la gestion des actifs physiques doit focaliser les ressources et les dépenses appropriées aux risques identifiés ainsi qu'aux coûts-avantages (ou coûts/bénéfices) associés. Notons que l'identification des risques est synonyme de dresser la liste des risques, les analyser, décrire leurs caractéristiques, et mesurer ou évaluer en terme de coûts leur impact afin de mieux les maîtriser dans les processus de gestion.

Au total, la gestion des actifs exige une approche d'intégration holistique ou globale d'un certain nombre de dimensions, socle de bonnes pratiques d'une gestion réussie des actifs.

En outre, si la gestion des actifs doit être définie suivant certains principes de base, elle ne doit pas se détourner de la politique de l'entreprise dont elle dépend strictement. La gestion des actifs doit donc définir sa politique et sa stratégie afin d'atteindre les objectifs de

l'entreprise. Pour cela, elle doit avoir des outils constituant un système devant répondre aux questions clés résumant les objectifs de toute entreprise. Par exemple: avoir une vue d'ensemble du parc d'actifs, connaître l'état de chaque actif, évaluer la performance de chaque actif au cours de son cycle de vie, adopter le niveau de service approprié pour chaque actif, respecter les lois et les réglementations, respecter l'environnement écologique, maîtriser les risques, maîtriser les coûts globaux de gestion afin de maximiser la rentabilité de chaque actif. Pour répondre à toutes ces questions, la gestion des actifs s'articule en huit concepts fondamentaux énumérés de façon descendante dans le PAS 55-2, mais qui sont intimement liés. L'Institut of Asset Management. et BSI (2008) ont cité les sept concepts suivants: la politique, la stratégie, les objectifs, la planification, les facilitateurs et les contrôles, la mise en œuvre de la planification, l'évaluation de la performance et son amélioration, et enfin la révision de la gestion.

Par ailleurs, la composition du système d'actifs ou encore du portefeuille d'actifs au sein d'une entreprise peut être diversifiée avec des niveaux de complexité différents. Plus précisément, dans l'entreprise, certains actifs physiques peuvent avoir des performances différentes, des durées de vie différentes, des technologies différentes, des investissements différents ou encore des niveaux de risques différents. Ainsi, certains actifs peuvent paraître plus critiques que d'autres, soit parce qu'ils sont plus coûteux et seront plus sollicités, soit parce qu'ils sont plus délicats ou fragiles, soit parce qu'ils constituent «les pierres angulaires» des performances de l'entreprise. Et pourtant, tous les actifs de l'entreprise sont tous importants (s'ils ne sont pas redondants), et doivent concourir à une vision commune dictée par les objectifs et les stratégies de l'entreprise. De même, malgré la diversification des types d'actifs (tangibles ou non tangibles) au sein de l'entreprise et leur nombre parfois impressionnant, une consolidation d'un regroupement coordonné de performances individuelles des actifs ou système d'actifs ainsi qu'une pondération des coûts et des risques, permettrait de mieux s'orienter vers une vision commune, celle de l'entreprise. Une gestion intégrée du système ou de portefeuille d'actifs s'avère donc indispensable à l'instar de toutes les composantes intégrées d'un édifice qui ont chacune leur part d'importance pour maintenir la structure et l'image de ce dernier, quand bien même certaines peuvent paraître plus

critiques que d'autres. Passons à présent en revue les éléments constitutifs du système de gestion d'actifs, mis en exergue ci-haut, ainsi que leur interdépendance.

1.1.2.2 Le système de gestion des actifs physiques

Comme nous l'indiquions dans le paragraphe précédent, la gestion des actifs physiques doit s'appuyer sur certaines dimensions de base, mais également qu'il est indispensable que la gestion intégrée des actifs se fasse suivant une vision de système composé d'éléments interagissant entre eux et dénommé système de gestion d'actifs par le PAS 55-2.

L'ISO (organisation internationale de normalisation) définit le système de gestion ou système de management comme étant: «un ensemble de procédures qu'une organisation doit suivre pour réaliser ses objectifs» (ISO, 2013).

De la conception ou de la naissance, à sa mise au rebut, les activités caractérisant le cycle de vie de tout actif physique sont : sa création ou son acquisition, son exploitation, son entretien, son renouvellement ou sa rénovation, son remplacement ou sa mise au rebut. Une politique de gestion est donc nécessaire pour un bon suivi du rendement des actifs physiques ou du système d'actifs physiques.

En effet, avec le système de gestion des actifs, l'atteinte des objectifs globaux de l'entreprise exige une stratégie qui découle de la politique de gestion des actifs et qui doit permettre la réalisation des objectifs voulus au niveau de chaque actif, de système d'actifs ou de portefeuille d'actifs. Ensuite, il sera nécessaire de faire une planification afin d'atteindre les objectifs fixés. Certains facteurs devront être pris en compte pour alléger le processus de planification et un contrôle de l'étape de planification est nécessaire avant la mise en œuvre du plan ainsi défini. Au cours du déroulement ou de l'exécution du processus de gestion des actifs, une évaluation de la performance et son amélioration continue sont nécessaires.

Enfin, une révision de la gestion permettra de passer en revue tout le processus afin de réitérer tout retour d'expérience ou toute nouvelle donnée pouvant améliorer le système.

Pour mener à bien toutes ces tâches, il est nécessaire d'avoir au préalable un inventaire fiable et complet, et que les activités du système de gestion des actifs soient documentées de façon adéquate afin de conférer une stabilité durable aux performances, aux coûts et aux risques identifiés du système. Un inventaire complet et fiable s'articule en des questions clés telles que: quels types d'actifs constituent notre parc? De combien sont-ils? Où sont-ils situés? Sont-ils fonctionnels ou défectueux? Pour combien de temps seront-ils encore opérationnels? Quelle est leur performance? Quels sont les actifs considérés comme actifs critiques? Les réponses rigoureuses à toutes ces questions représentent une condition sine qua non, préalable pour une gestion des actifs réussie.

1.1.2.2.1 La politique

Une fois la politique, les objectifs et la stratégie de l'entreprise sont définis, l'étape suivante est la mise en place de la politique de gestion des actifs physiques dont un inventaire préalable fiable et complet doit avoir été réalisé comme nous le précisons ci-haut. Il s'agit de définir les attentes selon la politique et les objectifs globaux de l'entreprise, mais également des pratiques et les principes de base de gestion au respect des directives de l'entreprise.

1.1.2.2.2 La stratégie

La stratégie du système de gestion des actifs regroupe les différentes méthodes, les ressources ou les différents moyens techniques, financiers, humains, économiques à mettre en œuvre pour réaliser la politique du système de gestion prédéfinie. Elle définit une représentation des moyens à déployer dans le temps dans la gestion des actifs.

De nos jours les normes, les lois et normes sont devenues plus sévères pour le respect de l'environnement et de la santé et sécurité au travail. En ce sens, la définition de la stratégie du système d'actif doit tenir compte entre autres de ces réalités et ne doit pas unilatéralement se baser sur la recherche effrénée de gain.

1.1.2.2.3 Les objectifs

Ils s'identifient aux buts poursuivis par le système de gestion dont ils découlent strictement, et doivent être en cohérence avec la politique et stratégie globale de l'entreprise. Les objectifs du système de gestion des actifs peuvent se traduire par exemple par le fait d'avoir une certaine qualité pour ces produits et services, un certain niveau de risque admissible, une assurance d'une certaine capacité de production ou encore un taux de rendement à atteindre pendant une durée prédéterminée. Une évaluation des résultats des objectifs doit permettre de savoir s'ils s'alignent sur la stratégie du système de gestion des actifs de l'entreprise. Ces résultats décrivent la performance de l'entreprise et établissent le lien entre stratégies et performance. Il est nécessaire que les objectifs soient réalisables sur un temps prédéfini.

1.1.2.2.4 La planification

Les objectifs étant définis et les moyens décrits par la stratégie, il reste au processus de planification d'établir dans le temps la réalisation des objectifs fixés avec une optimisation des moyens disponibles. Il s'agira de planifier l'ensemble des opérations qui s'étendent de l'acquisition ou la création des actifs à la gestion de leur cycle de vie, avec la maîtrise des risques et des coûts, ainsi que la pérennisation des performances des actifs ou système d'actifs. En nous inspirant du catalogue de la ville d'OTTAWA sur la gestion intégrée des actifs (les infrastructures de la ville), un modèle qui respecte bien la démarche du PAS 55-2 et qui lui a valu d'ailleurs le prix d'excellence Tereo en gestion des actifs (Tereo Asset management Awards) en 2013 (Ottawa, 2012), nous pouvons articuler le processus de planification du système de gestion des actifs comme suit :

- *Gérer la demande ou la création* : il s'agit par exemple des demandes futures aussi bien de produits de services ou d'actifs, d'améliorer la qualité des produits ou les niveaux de service rendu à la clientèle, ainsi que du respect strict des normes et réglementations.

- *Gérer le cycle de vie des actifs ou système d'actifs* : il s'agit de bien connaître chaque actif ainsi que son état de fonctionnement, analyser leur cycle de vie, définir la politique de maintenance appropriée, définir les ressources et les méthodes appropriées pour un haut niveau de performance eu égard à la vision et aux objectifs de l'entreprise, identifier et maîtriser les risques associés à chaque actif.
- *Gérer les finances* : pérenniser la rentabilité des actifs, leur performance par une analyse financière de type coût-avantage sous-tendu par un bilan des actifs, un suivi de rendement des actifs confronté aux objectifs et stratégies de l'entreprise.

1.1.2.2.5 Les facilitateurs et les contrôles

Une stratégie solide, des objectifs réalistes ou encore une excellente planification, fondée sur des théories d'expertise ne suffit pas à eux seuls pour réaliser une gestion efficace et efficiente (c'est-à-dire performante) du système d'actifs. Il est primordial selon le l'Institut of Asset Management. et BSI (2008), que l'entreprise dispose, des technologies adéquates, des outils bien calibrés et disponibles, ainsi que des connaissances et des ressources compétentes organisées de manière bien structurée et stable où les rôles, les responsabilités et les autorités sont clairement définis, et ce, en concordance avec la politique, les stratégies et les objectifs de l'entreprise. C'est une telle structure bien établie qui pourra faciliter et contrôler la bonne marche de la gestion du système d'actifs, être à la hauteur de dresser un bilan et un suivi du rendement des actifs ou système d'actifs de l'entreprise, afin d'en améliorer au besoin la performance et la pérenniser.

1.1.2.2.6 La mise en œuvre de la planification

La mise en œuvre de la planification représente l'ensemble des opérations à exécuter selon la planification prédéfinie. L'Institut of Asset Management. et BSI (2008) recommandent que toute organisation doit créer, développer et maintenir des processus ou des procédures de développement des plans de la gestion de ses actifs ainsi que le contrôle des activités tout au

long de leur cycle de vie incluant : la création, l'acquisition et l'amélioration des actifs; l'utilisation des actifs; la maintenance des actifs; le déclassement ou la disposition des actifs.

Chacun de ces concepts clés se traduit comme suit :

- *La création, l'acquisition et l'amélioration* se rapportent à l'exécution des opérations de projets d'acquisition ou de création de nouveaux actifs, de nouveaux produits et services. Tandis que l'amélioration se rapporte aux opérations orientées vers une augmentation de la performance des actifs détenus par l'organisation, ainsi qu'une amélioration en quantité et en qualité des produits et services offerts par l'entreprise afin de satisfaire sa clientèle. Les opérations d'amélioration intègrent également toute tâche menée pour veiller au respect des normes et réglementations.
- *L'utilisation des actifs* : regroupe l'ensemble des actions orientées vers le respect des instructions d'exploitation des actifs incluant les règles de sécurité, les conditions environnementales d'utilisation. En d'autres termes, l'utilisation des actifs intègre les instructions au respect par exemple de la température ambiante, la pression, l'humidité, ainsi que les bonnes méthodes d'exploitation selon les normes, les recommandations des fabricants, les lois sur le respect de la santé et sécurité (aspect risque) et l'aspect ergonomique dans l'environnement du travail. Ces opérations ont un impact aussi bien sur les actifs que sur les ressources qui les exploitent et affectent ainsi les performances et les risques du système de gestion des actifs.
- *La maintenance des actifs* : elle inclut toutes les tâches de maintenance à réaliser selon un choix d'une politique et d'une stratégie de maintenance appropriées à chaque type d'actifs ou parc d'actifs, selon leur niveau de criticité, leur niveau de complexité, leur état, leur sollicitation par la production et selon les ressources disponibles. Les tâches de maintenance peuvent être exécutées selon un type de maintenance donné jugé adéquat. Il est également possible que les tâches de maintenance soient effectuées par un organisme externe à l'entreprise par des contrats d'impartition ou de sous-traitance. Cependant, il est important de souligner que le bon choix d'une politique de maintenance ainsi que la

performance de celle-ci, est essentiel pour obtenir la performance du système de gestion d'actifs. La maintenance des actifs reste le cœur de la gestion des actifs de l'organisation. Nous reviendrons plus amplement dans les chapitres suivants, sur les détails nécessaires sur la maintenance des actifs.

- *Le déclassement ou la disposition des actifs* : tout actif a une durée de vie. Lorsque le déclin de son cycle de vie s'amorce, une évaluation des indicateurs de performance l'indique et il s'avère indispensable de comparer entre autres le coût de son remplacement au coût de sa rénovation. Essentiellement, une évaluation de type coût-efficacité et coût-avantages est effectuée pour aider à une prise de décision. Cette évaluation intègre entre autres les calculs d'amortissement de l'actif, tous les éléments à prendre en compte pour un projet d'acquisition du neuf (gestion des risques, gestion de la qualité, gestion des coûts, gestion du changement, etc.), les coûts directs et indirects de maintenance, les coûts liés à la mise au rebut de l'actif. Tous ces aspects doivent être examinés et doivent éclairer dans une prise de décision orientée vers une disposition de l'actif ou non.

Notons enfin de tout ce qui précède dans la mise en œuvre de la planification, que le contenu (processus et procédures) de toutes ces opérations de planification ne peut être figé d'un actif ou système d'actifs à un autre et à plus forte raison d'une entreprise à une autre. En réalité, avec la variabilité en types et en nombre des actifs dans une entreprise ajoutée aux variations attendues de l'état de performance de tout actif pendant les phases de son cycle de vie, il est évident que la politique, les stratégies ou objectifs au niveau de chaque actif ou parc d'actifs soient adaptés, mais strictement alignés sur la politique, la stratégie et les objectifs du système de gestion d'actifs d'une part, et sur la politique globale de chaque entreprise d'autre part. Plus concrètement, les investissements à consacrer pour la mise en œuvre des opérations de chaque politique adéquatement définie pour chaque actif ou système d'actifs, devra s'inscrire dans un concept coût-efficacité et coût-avantages. Plus ces investissements pour un actif seront importants, et plus il sera considéré comme critique et son état de fonctionnement surveillé minutieusement pour maîtriser les risques et maximiser sa performance. En ce sens,

il est nécessaire que toutes ces opérations de gestion du système d'actifs soient suivies et contrôlées en temps réel afin d'évaluer, d'anticiper sur des écarts de fiabilité opérationnelle et d'améliorer au besoin leurs performances au fur et à mesure de leur exécution. Par exemple pour les opérations de maintenance, l'(Institute of Asset Management. et BSI, 2008) suggèrent que : les stratégies de maintenance soient proactives et fondées sur le risque en tenant compte de l'état et la criticité de l'actif.

Le prochain volet important dans cette démarche de système de gestion des actifs physiques décrit l'évaluation et l'amélioration de la performance des actifs ou systèmes d'actifs.

1.1.2.2.7 L'évaluation et l'amélioration de la performance

La pérennisation de la performance de la gestion du système d'actif ne peut être effective que si les résultats des objectifs de cette dernière sont évalués et améliorés de façon continue. L'évaluation inclut les mesures systématiques de bilans et des suivis de rendement des actifs ou systèmes d'actifs. En ce sens, il est indispensable de surveiller minutieusement et de façon régulière ou continue les indicateurs de performance de chaque actif, dont la déviation par rapport aux objectifs attendus permet de prendre des décisions de correction des défauts et d'amélioration rapide de performance.

Suivant l'état et le niveau de criticité de chaque actif, une surveillance réactive versus proactive peut être adoptée. La surveillance réactive mettra en œuvre des tâches de maintenance réactive c'est-à-dire des tâches de maintenance exécutées pour corriger les écarts d'indicateurs de performance passés ou existants sur un actif. Une amélioration est alors possible après des analyses de défaillance qui permettent d'établir par exemple l'effet de causalité, corriger la défaillance et d'en éliminer les risques éventuels associés. La surveillance proactive quant à elle permettra d'exécuter juste à temps des tâches de maintenance de façon à anticiper sur la survenue prochaine des écarts de performance. Cette deuxième forme de surveillance nécessite des technologies spécifiques à elle. Mais elle est génératrice de nombreux avantages qui améliorent significativement la performance du

système de gestion d'actifs et doit être préconisée par rapport à la maintenance réactive. C'est le cas par exemple de la maintenance prédictive utilisant des technologies qui permettent de surveiller en temps réel l'état de fonctionnement des actifs physiques et dont les retombées pour l'entreprise défient toute autre forme de maintenance. Avec les données d'état et de performance en temps réel et continu des actifs, il devient alors plus aisé d'améliorer leur performance ainsi que celle de l'entreprise. Ici également tout risque identifié ou tout indice de non-conformité est éliminé de façon anticipée. Nous reviendrons dans les chapitres suivants, sur la maintenance prédictive ainsi que les nombreux avantages que son adoption procure aux entreprises.

1.1.2.2.8 La révision de la gestion

Comme nous l'indiquions dans le paragraphe précédent, au cours de la mise en œuvre de la planification, une évaluation continue du rendement des actifs ainsi qu'une amélioration continue de performance sont exécutées. Mais, une analyse des résultats d'objectifs mesurés et jugés non conformes aux stratégies prédéfinies malgré d'énormes efforts d'amélioration, à laquelle peut s'ajouter une apparition de nouvelles réglementations, peut obliger l'entreprise à faire un changement de politique, de stratégies ou d'objectifs de gestion de ses actifs.

De même, une modification des ressources disponibles, une introduction de nouveaux produits et services, l'effet de la concurrence, etc. peuvent amener l'entreprise à changer de stratégie, ou de politique. Avec les opérations de révision de la gestion, une analyse et une maîtrise efficaces de ces changements peuvent être réalisées afin de permettre à l'entreprise de conserver son niveau de performance et de compétitivité.

Au total, la révision de gestion est le «point retour» dans la boucle de système de gestion des actifs qui réitère les concepts de base de l'entreprise en les rajustant ou en les raffinant au besoin.

De façon succincte, trois niveaux peuvent décrire la gestion des actifs physiques (Galar et al., 2012).

- le *niveau stratégique* qui est une vision à long terme dont l'objectif principal est l'optimisation des ressources investies ou consenties,
- le *niveau tactique* qui est une vision à moyen terme dont l'objectif principal est d'optimiser les risques et les coûts,
- le *niveau opérationnel* qui est une vision à court terme dont l'objectif est l'optimisation des activités des cycles de vie des actifs.

Mais, malgré toutes ces précieuses considérations et recommandations décrites par le PAS 55, la gestion des actifs physiques reste une tâche complexe de nos jours à cause des actifs de conception technologique de plus en plus complexe qui semble exiger une politique de gestion au même diapason que leur niveau de complexité. Il est donc nécessaire de redéfinir un nouveau concept de maintenance mieux adapté aux nouvelles données technico-économiques des actifs afin de garantir une optimisation de la fiabilité de la gestion de maintenance au sein de l'entreprise.

Dans les lignes à suivre, nous allons examiner ce nouveau concept de maintenance révolutionnaire encore peu connu par les gestionnaires des entreprises.

1.2 Un nouveau concept de maintenance pour les actifs physiques intelligents

Les avancées technologiques apportent de profonds et perpétuels changements dans la gestion des équipements industriels ainsi que dans les systèmes de production, en augmentant leur niveau de complexité (Borissova et Mustakerov, 2013). En effet, les technologies utilisées dans la conception des actifs physiques deviennent de plus en plus complexes et donnent lieu à des actifs de plus en plus intelligents qui témoignent d'une multi technicité accrue. Le résultat est un actif intelligent plus complexe avec une fiabilité difficile à maîtriser, mais exigeant une performance optimale et un environnement opérationnel moins risqué et sécuritaire. (Borissova et Mustakerov, 2013).

Ainsi, cette modernisation technologique des actifs physiques rend plus complexes les diagnostics des défaillances dont les origines sont parfois difficiles à élucider. Autrement dit, malgré le caractère aléatoire connu d'une défaillance, il est des défaillances stables dont le diagnostic peut paraître plus aisé; mais aussi, il existe des défaillances intermittentes pouvant apparaître dans certaines conditions données et disparaissant dans d'autres conditions sans une possibilité de traçabilité par un mécanisme connu et sans un caractère reproductif. (Bo et al., 2012). Dès lors, il devient plus complexe d'étudier ou même de prédire la fiabilité des actifs physiques ainsi que de diagnostiquer ou de prédire les défaillances des actifs physiques au cours de leur cycle de vie.

L'intégration de l'informatisation de la gestion de maintenance des actifs par les logiciels de GMAO fait partie des plus anciens concepts historiques de l'introduction des systèmes de technologies de l'information et de communication au sein des entreprises (Mouzoune et Taibi, 2013). D'ailleurs le concept d'e-maintenance apparut depuis des décennies, et évoluant au même diapason que les technologies de l'information et de la communication (TIC), a pour principe de base l'introduction des technologies de l'information et de communication dans la stratégie de maintenance. (Mouzoune et Taibi, 2013). En réalité, l'E-maintenance peut être considéré soit sous forme d'un système ou méthode de gestion de maintenance, soit sous forme d'une politique de maintenance ou d'une planification de maintenance (Borissova et Mustakerov, 2013). En outre, l'e-maintenance peut être défini comme un outil de soutien à la maintenance ou encore comme un type de maintenance ou une méthode de maintenance (Borissova et Mustakerov, 2013). Autrement dit, le concept d'E-maintenance représente une extension de la télémaintenance (maintenance à distance), intégrant la gestion de plusieurs autres composantes de l'entreprise dont le type ou la politique de maintenance prédictive (incluant tous les processus et technologies de maintenance prédictive) (Borissova et Mustakerov, 2013), et toutes les parties impliquées dans la gestion des actifs de l'entreprise tels que le soutien technique, les analystes des technologies des actifs de l'entreprise, la gestion de la connaissance, ainsi que les preneurs de décisions (Borissova et Mustakerov, 2013; Macchi et Garetti, 2006). Les objectifs essentiels visés par l'adoption d'e-maintenance sont d'organiser et de structurer afin de développer un système de maintenance efficace et

efficace durant le cycle de vie de l'actif, et ce, par le biais des technologies de l'information et de communication (Oliveira, Araujo et Jardine, 2013). Donc, la Gestion de la maintenance assistée par l'ordinateur ainsi que la gestion de la maintenance prédictive ne sont que des composantes à part entière de l'E-maintenance. En ce sens, les GMAO ont contribué de façon relative à l'allégement de la tâche aux gestionnaires d'entreprises en aidant entre autres, à la collecte et au traitement de données d'opérations de maintenance ainsi qu'à l'amélioration de leur planification.(Galar et al., 2012). Mais, avec le profit maximum recherché par les gestionnaires qui repose sur une optimisation durable des performances des actifs de l'entreprise, il est nécessaire de mesurer de façon continue les performances de ces nouveaux actifs intelligents afin d'éliminer toute cause pouvant altérer leur disponibilité et leur rentabilité. En conséquence, il s'avère indispensable de faire un choix approprié de politique de maintenance, car la performance de cette dernière en dépend (Tsang et al., 2006).

La démarche innovatrice de maintenance des actifs recommandée par ISO 13381-1:2004, et reprise par Borissova et Mustakerov (2013), comprend l'étape de surveillance, suivie du diagnostic, du pronostic et du pronostic après traitement. (Galar et al., 2012) (Borissova et Mustakerov, 2013).

De nombreux travaux académiques de recherche et de développement ainsi que les expériences acquises par les professionnels de l'ingénierie ont permis de concevoir des systèmes sophistiqués qui permettent de mieux suivre l'état des actifs afin d'améliorer leur disponibilité, d'augmenter leur performance et de réduire les risques associés (Lee J. et al., 2013). Ainsi, de nouvelles technologies (matériels et logiciel) permettent d'accroître la disponibilité des actifs physiques dans les industries, d'éviter des défaillances soudaines des machines, et de mettre en œuvre des opérations préventives de façon anticipée et programmée selon des intervalles de temps appropriés sans nuire à la production. Ces nouveaux outils permettent de surveiller l'état de santé des machines ainsi que leurs composantes constitutives. Il devient donc possible d'obtenir des données fiables en temps réel permettant de faire des pronostics sur la prochaine défaillance ou prédire la performance

future des actifs physiques. Les bénéfices d'une telle nouvelle approche dans la gestion de la performance des actifs physiques procurent aux utilisateurs et gestionnaires industriels une garantie de la qualité des produits et services, une maintenance juste à temps, augmentent la disponibilité et évitent les défaillances catastrophiques (Lee J. et al., 2013). Et pourtant, malgré ces nombreux avantages, rares sont les entreprises qui ont adopté ces technologies de surveillance d'état des actifs afin d'optimiser leur gestion (Jantunen et al., 2011). Techniquement, le système de surveillance continue d'état des actifs physiques regroupe, la collecte, le traitement ou l'analyse et une initiation de décisions. C'est un processus qui peut être décrit sous deux aspects.

Le premier aspect, s'exprime par des algorithmes complexes utilisant des historiques de données de capteurs installées sur les machines pour définir un modèle de tendance de dégradation de machines qui servira de référence par la suite pour la surveillance des performances pour ce type de machines (Lee J. et al., 2013). Le deuxième s'exprime par des modèles mathématiques prédéfinis servant de référence pour déterminer les écarts de performance des machines en surveillant leur état de façon continue. Mais, pour les multitudes d'actifs critiques de l'entreprise dont l'arrêt est peu souhaitable, la collecte, le traitement et le stockage de la pléthore de données dispersées dans l'industrie, et issues des multitudes capteurs, nécessitent un déploiement de ressources et d'infrastructures de technologies de l'information telles que les matériels (Bases de données serveurs) et des logiciels (serveur-logiciel d'application). Ces infrastructures exigent des coûts très élevés d'acquisition, d'implantation et d'entretien (Lee J. et al., 2013) (Zhipeng et Aiping, 2011) (Bo et al., 2012). En outre, le développement et l'adoption d'une stratégie de prédiction de vie utile des actifs par une surveillance de leur santé, exigent beaucoup de temps et de ressources (matériels sophistiqués dispendieux et ressources bien formées) pour couvrir un ensemble de processus qui inclut les tests, les acquisitions de données, un développement et une validation d'algorithmes et de logiciels (Lee J. et al., 2013).

En somme, il ressort de tout ce qui précède qu'avec des actifs physiques de plus en plus intelligents de nos jours, il est nécessaire de développer des outils également intelligents qui

permettront de collecter des données d'état de performance des machines, afin de suivre en temps réel leur état de santé et de prédire leur durée de fonctionnement résiduelle. C'est une nouvelle stratégie de maintenance dite prédictive qui utilise des technologies qui lui sont propres et que nous développerons plus amplement dans les chapitres suivants.

Cependant, soulignons certaines limites de l'adoption d'une maintenance prédictive :

- La première se traduit par des prises de décision qui sont centrées sur la surveillance de l'état de l'actif sans tenir compte de son âge, nécessitant de ce fait un *benchmarking* pour des prises de décisions fiables.(Galar et al., 2012).
- La deuxième limitation réside dans le fait que les différentes technologies utilisées dans la surveillance d'état des actifs sont propres aux actifs visés sans tenir compte de données issues de la surveillance d'autres actifs de mêmes types (modèle et marque). La définition d'un modèle générique caractérisé par des spécifications de fonctionnement de base serait donc nécessaire. (Galar et al., 2012)
- À ces deux limitations s'ajoutent les coûts souvent élevés nécessaires pour le déploiement des infrastructures informatiques (matériel et logiciel) et les coûts d'une formation continue qualifiée du personnel technique (Lee J. et al., 2013) (Bo et al., 2012).
- De plus, une autre importante limitation et qui affecte de façon significative la performance des actifs, est la difficulté à intégrer ou à combiner de façon efficace, les données de surveillance d'état des actifs avec des données de cycle de maintenance dans les logiciels de GMAO. Ceci est dû à l'incohérence temporelle des données disparates issues des sources telles que les répertoires de données de surveillance d'état des actifs (mesurées en temps réel) et ceux des données de GMAO (mesurées en temps calendaire : jour, mois, année), et provenant de plusieurs départements de l'entreprise, rendant difficile leur combinaison pour une exploitation efficace. (Galar et al., 2012).

Dans ce contexte, l'avènement de l'info nuage (ou informatique en nuage encore appelé le *cloud computing*), un nouveau concept de réseaux de télécommunication en technologie de l'information (TI), semble salvateur. En effet, la combinaison de la maintenance prédictive avec le concept infonuagique devient une stratégie innovatrice qui pourrait améliorer significativement la gestion de performance des actifs physiques.

Parmi les nombreux avantages dans l'adoption conjointe d'une maintenance prédictive et d'une informatique en nuage, nous pouvons citer l'élimination des coûts exorbitants d'acquisition et de maintenance des infrastructures informatiques tels que serveurs de logiciels d'application et serveurs de bases de données (Lee J. et al., 2013) (Zhipeng et Aiping, 2011). En effet, la plupart des infrastructures informatiques autrefois nécessaires pour la gestion des données de maintenance prédictive, seront éliminées par les caractéristiques d'extensibilité et de la flexibilité de l'info nuage qui lui permettent de supporter de grands volumes de flux de données (les algorithmes, et les flux de données de gestion), ainsi que leur meilleure manipulation (Zhipeng et Aiping, 2011). Plus concrètement, l'enrichissement par un grand volume d'échanges d'algorithmes de surveillance de l'état de santé des machines ainsi que le flux des données de gestion de maintenance in situ, entre des groupes de praticiens versus les groupes de la recherche et développement au niveau académique, offre une transformation aisée et efficace du contexte académique au contexte de services pratiques en industrie (Lee J. et al., 2013). Autrement dit, l'info nuage apporte à la maintenance prédictive la possibilité d'avoir accès à distance de façon centralisée à des données provenant de sources disparates dans l'entreprise. En un mot, Laut et al. (2013) ont montré dans leurs travaux que les données de gestion autrefois disparates géographiquement sur plusieurs sites d'une entreprise peuvent être unifiées grâce aux opportunités offertes par l'infonuagique pour optimiser la gestion des actifs physiques. Donc l'infonuagique facilite les échanges d'informations fiables et de soutien de qualité entre les employés d'une même entreprise multi sites ou même d'entreprises tierces (relation clients-fabricants et clients-clients d'un même fournisseur). Ainsi, plus d'inquiétudes sur les compétences à pourvoir par l'entreprise pour la maintenance des infrastructures informatiques dispendieuses, les employés deviennent plus productifs et ont accès à des

technologies de pointe coûteuses que leur entreprise ne pouvait peut être ne pas se procurer facilement (Zhipeng et Aiping, 2011).

Tout ceci décrit des avantages économiques qui permettent de réduire considérablement les investissements qui naguère devraient être consacrés aux infrastructures informatiques de l'adoption d'une maintenance prédictive non hébergée dans l'info nuage.

De tout ce qui précède, il semble que l'industrie de maintenance prédictive fera d'énormes profits avec l'info nuage plus que toute autre forme d'industrie (Kenneth Piety et Geswein, 2011).

Dans cette optique, la figure 1.1 ci-dessous de Lee et al. (2013) montre un exemple édifiant de la méthodologie et la structure du système de gestion infonuagique des pronostics de défaillances par une surveillance en temps réel des données d'état de santé des actifs physiques. Cette méthodologie s'inspire de l'Infrastructure as a service (IaaS) et utilise comme composants de base les algorithmes issus de la *boîte à outils de l'agent de surveillance d'état et de pronostics* de l'Intelligent Maintenance Système (IMS), pour initier des flux de travaux de gestion de pronostics et d'état de santé des actifs. Plus amplement, l'intrant de ce système de gestion infonuagique intègre les données de surveillance d'état des actifs illustrées ici sur la figure 1.2 par la *boîte à outils de l'agent de surveillance d'état et de pronostics* de l'Intelligent Maintenance Système (IMS), l'extrait du système étant un Paas (Pronostics as a service) c'est-à-dire une offre de service de pronostics de défaillances. La richesse dans ce système de gestion proposé par Lee et al. (2013), réside dans l'intégration d'intrants constitués de données de surveillance d'état des actifs mais aussi de données importantes telles que : les données opérationnelles de l'actif, les connaissances d'experts en maintenance (ingénieurs et scientifiques etc.). En d'autres termes, ce concept de Lee et al. (2013) explique comment en intégrant les données de surveillance en temps réel de l'état de santé des actifs physiques dans l'infonuagique, une gestion optimisée des pronostics de défaillances peut être assurée et permettre ainsi d'améliorer la performance du parc d'actifs des entreprises.

Enfin, pour accroître la performance des actifs physiques, il est nécessaire de ne pas perdre de vue, l'obligation de mieux intégrer la gestion de performance des diverses ressources de l'entreprise, de les optimiser au lieu de considérer la performance de chaque actif individuellement. (Galar et al., 2012). Cette approche initiée par le PAS 55-2 depuis quelques années a permis de réorienter le concept de gestion des actifs qui a été longtemps confondu à la gestion de la maintenance des actifs et que nous avons passé en revue dans la première partie du présent chapitre.

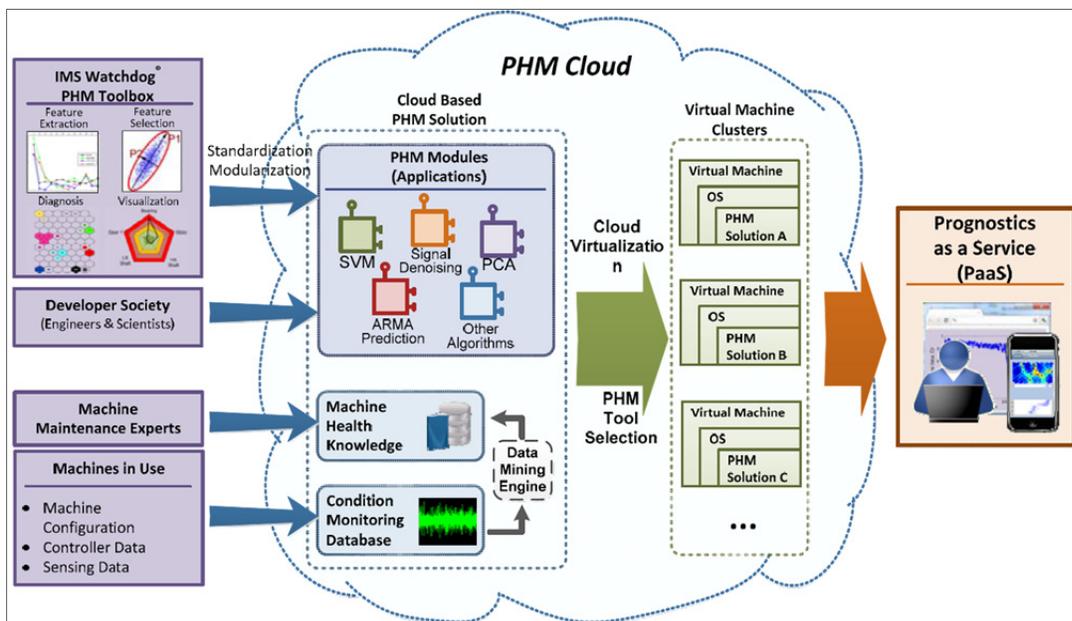


Figure 1.1 Méthodologie du système de gestion infonuagique des pronostics de défaillances et de l'état de santé des actifs
Tirée de (Lee et al. (2013), p.207))

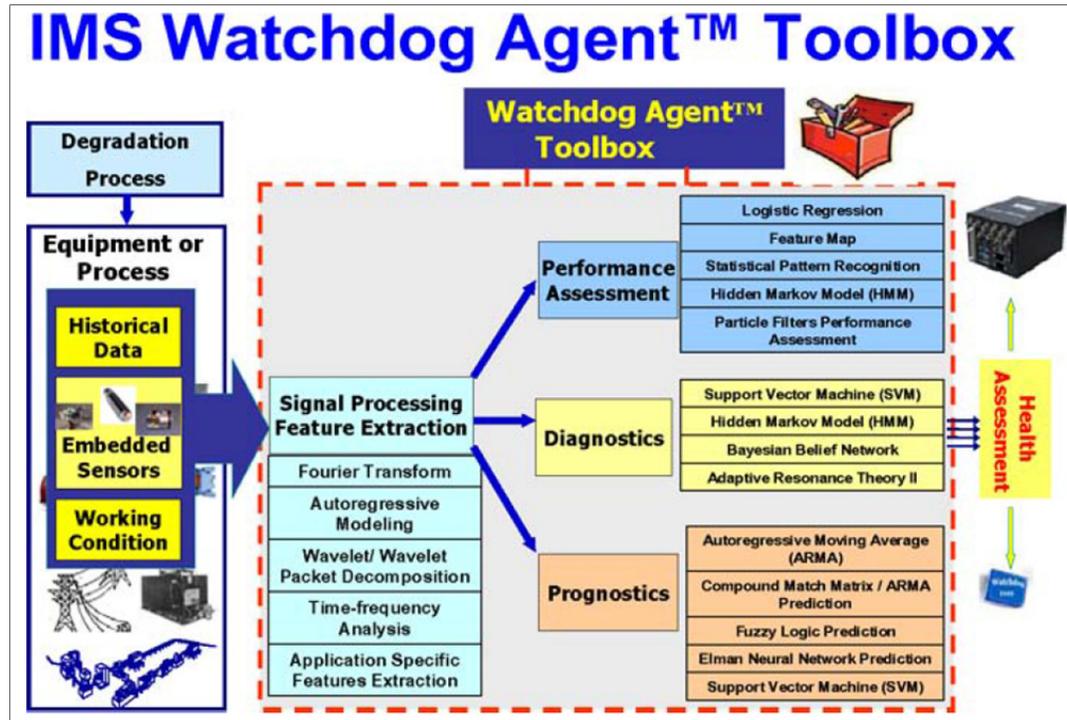


Figure 1.2 Boîte à outils de l'agent de surveillance de l'Intelligent Maintenance System (IMS)

Tirée de (Lee et Scott (2006), p.5)

1.3 L'impact de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques

Selon la structure de gestion des actifs promue par le PAS-55, tout actif physique exige des activités de maintenance tout au long de son cycle de vie afin de minimiser au maximum l'écart entre sa fiabilité intrinsèque (définie lors de sa conception et sa fabrication) et sa fiabilité opérationnelle (définie en utilisation). Aussi, en tant qu'une fonction incontournable dans la gestion des actifs physiques, la gestion de maintenance intègre plusieurs autres domaines de l'entreprise tels que les finances, les ressources humaines, la logistique, les ressources matérielles (Stocks), la conception, la recherche et développement, la sécurité. Cela explique en effet, l'impact notable qu'a la fonction maintenance sur la gestion des actifs physiques.

Plus haut, nous avons introduit l'essor d'un nouveau concept de maintenance prédictive infonuagique pour améliorer la gestion des actifs physiques intelligents contemporains. Les

déterminants essentiels de gestion sur lesquels une politique de maintenance prédictive influence grandement sont : **la sécurité, le temps, les coûts et les ressources** (Bo et al., 2012). Une optimisation de ces quatre déterminants augmenterait donc de façon certaine la performance de la gestion des actifs physiques.

Hormis les économies énormes réalisées sur l'élimination des infrastructures informatiques dispendieuses autrefois utiles dans le concept de base de la maintenance prédictive et, supprimées par l'environnement infonuagique (Zhipeng et Aiping, 2011), de profonds changements s'exprimant en termes de bénéfices sur la gestion des actifs physiques s'articulent sur plusieurs plans intégrant les avantages de la maintenance prédictive largement développés par Bo et al. (2012) intégrés dans la richesse de l'analyse quantitative et qualitative de l'infonuage développée par Wu et Gan (2011).

1.3.1 Sur le plan de la conception des actifs physiques

Selon Bo et al. (2012), les différentes données d'historiques collectées sur les actifs physiques aident à prédire les défaillances, leur durée de vie résiduelle et d'anticiper l'exécution des tâches de maintenance préventive, mais surtout peuvent fournir des informations cruciales sur la variation de la performance de l'actif dans le temps ainsi que son comportement face aux conditions environnementales et les contraintes d'exploitation.

Ces données représentent des retours d'expérience qui confrontent les données théoriques de conception de l'actif et celles pratiques relevées sur site. Elles peuvent donc servir à améliorer la conception et le développement de cet actif en le rendant plus robuste, plus fiable et améliorant les instructions d'utilisation et de maintenance.

En outre, dans un environnement infonuagique, ces données sont centralisées; ce qui facilite de façon transparente le partage et la collaboration des parties prenantes (concepteurs, fournisseurs, utilisateurs, clients) (Zhipeng et Aiping, 2011) (Kenneth Piety et Geswein, 2011) (Oliveira, Araujo et Jardine, 2013). Cet avantage de l'infonuage ajouté à son caractère

instantané ainsi que son extensibilité permet des échanges, des communications et des traitements rapides, quel que soit le volume des données à partager. Il devient alors plus facile pour le fabricant de communiquer de nouvelles conceptions d'instructions d'utilisation, de maintenance ou d'amélioration en exploitant de nouveaux algorithmes de défaillances issues du traitement des données de surveillance d'état des actifs.(Bo et al., 2012).

1.3.2 Sur le plan de la production

Le caractère premier recherché pour tout actif physique est sa performance opérationnelle maximale tout au cours de son cycle de vie. En ce sens, il doit permettre d'avoir des produits ou des services de qualité. De façon traditionnelle dans l'industrie, le service technique se focalise sur les données de capteurs qui émettent des alertes dès qu'un seuil est atteint. Malheureusement, le moment où l'alarme ou l'alerte de défaillance est émise, il est déjà trop tard (Lee et Scott, 2006) et les conséquences sont induites dans le système de gestion de l'entreprise. En suivant ces alertes, les départements d'assurance qualité et de contrôle de qualité s'attèlent souvent à procéder à une calibration des actifs de production lorsque des écarts de performance sont constatés, en comparant les caractéristiques du produit ou de service à l'étalon. C'est une démarche qui nécessite du temps précieux, une mobilisation de ressources humaines et matérielles, un arrêt de production, et donc des coûts. (Bo et al., 2012). De même, cette manière de procéder est assez superficielle et est loin d'être fiable. Car les écarts de performance constatés peuvent avoir été induits par la dégradation graduelle de certains composants intrinsèques de l'actif ou même par des facteurs de stress externe (conditions environnementales, manipulation, mauvais usage) (Deloux, Castanier et Berenguer, 2012) (Bo et al., 2012) . Certes, plusieurs méthodes d'analyse de défaillances ont contribué pendant des décennies à améliorer la performance des actifs. Mais, avec l'accès facile des données de surveillance continue de l'état des actifs, collectées par le dispositif de maintenance prédictive, et, disponibles de façon centralisée dans l'info nuage, des actions correctives peuvent être prises de façon anticipée avant qu'une répercussion notable n'affecte le produit ou le service rendu par l'actif. Le traitement rapide des informations d'état de l'actif ainsi que la meilleure communication entre le service de production et le service de

maintenance grâce une collaboration efficace par l'info nuage, permet des prises de décisions éclairées ainsi que des actions rapides et mieux planifiées de maintenance sans nuire à la production (Zhipeng et Aiping, 2011). Mieux, les actions exécutées de façon anticipée ainsi que de nouvelles instructions d'utilisation sur un actif donné selon les données recueillies sur son état sont partagées avec d'autres gestionnaires d'un modèle semblable d'actif sur un autre site, qui peuvent surveiller à leur tour sa performance (Lee J. et al., 2013). Ainsi, sur le plan de la production, l'hébergement de la maintenance prédictive dans l'info nuage profite de la richesse de cette dernière, dont l'impact majeur est ressenti sur la quantité et la qualité des produits et services, une satisfaction de la clientèle et une compétitivité garantie (Zhipeng et Aiping, 2011).

1.3.3 Sur le plan opérationnel

Au cours de la durée de vie utile de tout actif, la fiabilité opérationnelle se dévie de la fiabilité prévisionnelle théorique, définie lors de la conception de l'actif, à cause des conditions actuelles environnementales et d'utilisation de l'actif (Bo et al., 2012). Dans le paragraphe précédent, nous avons expliqué comment la maintenance prédictive infonuagique peut fournir des données importantes pour améliorer la qualité des produits et des services rendus. Or, l'amélioration de la qualité des produits et des services exige une sûreté de fonctionnement, c'est-à-dire une fiabilité, et une disponibilité optimale de l'actif (Bo et al., 2012). Avec les informations produites par la maintenance prédictive infonuagique, une collaboration efficace entre utilisateurs, service de maintenance, service de contrôle et d'assurance qualité, et concepteurs, permet de raffiner la fiabilité opérationnelle des actifs. La prédiction des pannes permet d'anticiper sur les défaillances catastrophiques qui peuvent menacer la sécurité des utilisateurs. Les pertes de temps dues aux défaillances intermittentes de causes non connues ainsi que les fausses alarmes qui entraînent des arrêts de production et une mobilisation de ressources de maintenance sont évitées (Bo et al., 2012). De plus, les règlements et les lois sur la santé et sécurité au travail et la protection de l'environnement sont plus respectés. Autrement dit, améliorer la fiabilité opérationnelle en exploitant les données de maintenance prédictive peut aider à améliorer la santé et la sécurité des

utilisateurs, mais aussi prévenir d'éventuels rejets dans l'environnement d'affluents, sources de pollution.

Un autre avantage sur le plan opérationnel décrit par Bo et al. (2012), s'exprime par l'utilisation des données d'état de surveillance des machines pour régler les défaillances conflictuelles des actifs entre les compagnies d'assurances et leurs assurés; certaines défaillances pouvant être induites par les conditions environnementales ou un mauvais usage de l'actif et non à des défauts de ses propres constituants internes.

En somme, une adoption de maintenance prédictive infonuagique permet de rallonger la durée de vie des actifs en réduisant au maximum l'écart entre leur fiabilité opérationnelle et leur fiabilité prévisionnelle, tout en augmentant leur disponibilité et leur sécurité d'exploitation (sécurité intrinsèque à l'actif et la sécurité de son opérateur).

1.3.4 Sur le plan logistique et de maintenance

«La logistique est la gestion intégrale du processus d'acheminement des matières nécessaires à la production et de leur distribution à l'ensemble des points de consommation desservis par l'entreprise, c'est le flux sanguin de l'entreprise.» ((Stevenson, Benetti et Youssef, 2012), p.441) .En ce sens, elle constitue avec la maintenance deux fonctions clés dont l'exécution mobilise compte tenu de leur importance, du temps et la plus grande partie de ressources (humaines et matérielles), investies dans la gestion des actifs au cours de leur cycle de vie. Maîtriser ces deux fonctions serait source d'optimisation de la performance des actifs physiques. Le principe de la maintenance prédictive étant d'exécuter des activités de maintenance selon le pronostic des défaillances, un stock de pièces de rechange juste nécessaire permet de réduire considérablement les investissements importants requis en logistique pour la gestion traditionnelle des stocks; mieux, au cours de la phase de conception des actifs, la prise en considération des données de pronostic peut avoir un impact majeur sur le système de soutien logistique à pourvoir durant l'exploitation des actifs (Bo et al., 2012).

Lee et al. (2013) ont décrit une approche de maintenance prédictive basée sur la collecte de données d'états et d'exploitation de plusieurs machines durant toute leur durée de vie incluant leur conception, leur fabrication, leur acquisition, leur installation, leur mise en service, toutes les activités de leur maintenance et leur disposition. Une intégration de cette approche dans un environnement infonuagique offre une centralisation, et un accès rapide de ces précieuses données d'état et facilite la collaboration et le partage d'expérience entre concepteurs et utilisateurs. Autrement dit, cette approche permet de comparer les performances d'actif à actif de même type et permet d'avoir une meilleure transparence de la performance des actifs qui peut être utilisée pour l'inspection de la qualité des produits, la gestion du cycle de vie des actifs ainsi que leur conception (Lee et al., 2013).

Le vieillissement et l'obsolescence sont particulièrement des problèmes qui ont longtemps inquiété les gestionnaires des actifs physiques surtout ceux nécessitant une longue durée d'utilisation tels que les avions, les trains, les centrales nucléaires (Lee et al., 2013). Une adoption de maintenance prédictive infonuagique permettra d'éliminer les coûts dus aux nombreuses inspections, de mieux analyser la période de vieillissement de tels actifs, de redynamiser les composants constitutifs par des actions de maintenance appropriées conçues par une meilleure collaboration entre fabricants, utilisateurs, et le service de maintenance. Ces différentes parties prenantes peuvent partager à travers le réseau infonuagique leur expertise personnelle ou encore leur expérience sur d'autres actifs de mêmes caractéristiques installés sur d'autres sites et dont les informations de suivi d'état disponibles dans l'infonuage peuvent servir de références (Lee J. et al., 2013). Le résultat d'une telle démarche est la réduction de temps, de ressources humaines (main-d'œuvre), et matérielles (infrastructures informatiques, etc.) et de coûts dispendieux autrefois utiles pour la conservation de la fiabilité opérationnelle de l'actif (Zhipeng et Aiping, 2011). Il s'en suivra de toute évidence un prolongement naturel de la durée de vie de tels actifs sans compromettre la réalisation d'énormes bénéfices.

Par ailleurs, la prédiction de défaillance peut faciliter non seulement le diagnostic des pannes en permettant d'identifier avec précision les composants défaillants de l'actif et de les

remplacer plus rapidement, mais également de prédire de potentielles défaillances de l'actif (Lee J. et al., 2013). Cette assertion implique que: les données d'état de l'actif permettront au bureau de méthodes du service de maintenance de connaître avec précision le composant défaillant de l'actif, ou en voie de l'être, leurs causes, le mécanisme de leur manifestation et la fréquence de leur occurrence. Avec la facilité de communication et de partage d'informations par info nuage, le bureau de méthode pourra facilement collaborer avec le bureau ordonnancement et le bureau de réalisation pour mieux planifier les ressources humaines (main d'œuvre), les ressources matérielles (pièces de rechange et outillages de maintenance) et le choix du temps d'intervention approprié pour ne pas nuire à la production. Une telle approche permet donc de réduire les coûts directs de maintenance liés à la main d'œuvre, aux pièces de rechange, au temps d'exécution, etc., et aux coûts indirects de maintenance tels que les coûts dus aux arrêts de production et les «pannes induites lors des réparations ou les dommages collatéraux de réparation» (Bo et al., 2012). Les dommages collatéraux de réparation sont ceux observés lorsqu'en exécutant des tâches de maintenance, des composants voisins de ceux défectueux, au départ sains (avant intervention), se brisent.

En matière de maintenance prédictive, la quantité et la qualité des données d'état des actifs sont cruciales, mais son succès réside dans la qualité de l'interprétation de ces données.(Kenneth Piety et Geswein, 2011). De façon traditionnelle, une bonne interprétation des données de maintenance prédictive était l'apanage d'un expert ou un technicien expérimenté formé à cette pratique et dont la présence sur site est nécessaire. Mais avec la centralisation des informations issues de la surveillance d'état des actifs, l'analyste ou l'interpréteur des données n'a nullement plus besoin d'être sur site. Car même étant absent, il peut avoir accès à distance via l'info nuage aux données à interpréter et de ce fait supporter à distance de façon efficace les techniciens moins expérimentés ou souhaitant sa collaboration. Au total, la maintenance prédictive infonuagique présente de nombreux avantages sur la logistique et la maintenance dans une entreprise.

1.3.5 Sur le plan du cycle de vie de l'actif

Nous avons vu plus haut comment les données de la maintenance prédictive infonuagique permettent d'économiser de façon significative du temps et des ressources (humaines, matérielles) pendant la phase de la conception des actifs physiques, leur fabrication et améliore leur performance opérationnelle depuis la phase de mise en service jusqu'à sa vieillesse.

À la vieillesse de l'actif, un choix crucial s'impose entre sa disposition ou son remplacement par un actif neuf. De façon traditionnelle, une évaluation permet de comparer le coût de rénovation par opposition aux coûts de la mise au rebut de l'actif usagé et son remplacement par un actif neuf. (Bo et al., 2012).

Dans l'approche de maintenance prédictive infonuagique, les informations de surveillance de l'état de l'actif au cours de son cycle de vie permettront de faire une rétrospective de son comportement dans le temps, des facteurs ayant influencé sa performance opérationnelle versus sa performance prédictive, mais surtout de la somme du capital investi pour maintenir l'actif fonctionnel et productif. Ces informations disponibles dans l'info nuage permettront une meilleure collaboration entre toutes les parties prenantes de l'entreprise devant examiner la mise au rebut ou la rénovation de l'actif.

De nos jours, il existe deux options qui sont utilisées à la fin de cycle de l'actif : l'une est la *refabrication* et l'autre est le *recyclage*. Dans les deux cas, les actifs sont considérés comme égaux, car aucune donnée sur leur état durant leur durée de vie utile n'est disponible. (Bo et al., 2012). Or, nombreux sont les actifs disposant encore de composantes viables encore exploitables, mais dont la fiabilité résultante est minimale. Avec donc l'analyse des données du cycle de vie des composants d'un actif, les coûts de remplacement de pièces ayant encore une durée de vie utile sont éliminés. Finalement, les données de surveillance d'état de l'actif usagé pendant sa durée de vie utile produiront des précisions sur les conditions environnementales et les conditions d'usage de l'actif. Ce sont des données dont l'intégration

permet de mieux préparer les nouvelles conditions d'exploitation du nouvel actif substituant l'ancien.

Rappelons que le concept d'actif physique ne se limite pas simplement aux actifs physiques industriels. En conséquence, l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique connaît les mêmes retombées, quel que soit son domaine d'application. Si une application industrielle (usines) semble prépondérante, d'autres domaines particuliers tels que l'aéronautique, ou les établissements biomédicaux et hospitaliers peuvent aussi bien bénéficier de l'adoption de la maintenance prédictive dans un environnement info nuage.

En dehors de l'utilisation des technologies de maintenance prédictive pour actifs hospitaliers de types industriels (tels que les tuyauteries de vapeur d'eau, les compresseurs d'air, etc.), les équipements biomédicaux peuvent jouir de la maintenance prédictive infonuagique. Breunissen, Hardiman et Shubha (2005) ont développé un modèle breveté de maintenance prédictive pour les équipements biomédicaux. Le principe est d'optimiser la planification des tâches de maintenance afin d'optimiser le rendement de la fonction maintenance et donc la performance des équipements biomédicaux.

En réalité, de façon traditionnelle, en vue d'assurer la fiabilité opérationnelle des équipements médicaux, une planification des tâches de maintenance se fait suivant un temps calendaire, le cumul de la durée d'usage, de façon inopinée, à la suite d'une inspection, ou suivant une requête de l'utilisateur (Breunissen, Hardiman et Shubha, 2005). Mais une telle politique de maintenance est source de désavantages dont nous avons discuté plus haut.

Si des données opérationnelles sont collectées et exploitées à bon escient, la fiabilité opérationnelle peut être nettement améliorée. C'est pourquoi Breunissen, Hardiman et Shubha (2005) affirment que la planification des tâches de maintenance sur les équipements biomédicaux en général et en particulier sur les plus critiques (sensibles et spécialisés) tels que les appareils d'imagerie médicale diagnostique, peut être significativement améliorée en exploitant les données opérationnelles collectées de façon continue sur une ou plusieurs modalités transmises à travers le réseau informatique de la structure hospitalière.

Dans la même logique, une étude de cas effectuée par Zhang (2013) sur les équipements médicaux, montre qu'une stratégie de maintenance prédictive qui intègre l'exploitation des données opérationnelles des actifs peut minimiser les tâches inutiles de maintenance et réduire considérablement les coûts de maintenance.

En outre, en intégrant les données de performance opérationnelle dans l'infonuage, d'énormes économies seraient réalisées sur les infrastructures informatiques nécessaires à leur collecte et à leur traitement. De même, leur centralisation permettrait leur partage de façon transparente par toutes les parties prenantes et un *benchmarking*, conduisant à une prise de décision fiable et éclairée utile pour optimiser la gestion biomédicale et hospitalière reconnue historiquement très complexe. D'ailleurs la complexité de la gestion biomédicale et hospitalière s'identifie particulièrement dans le respect strict par les gestionnaires hospitaliers, d'une triple contrainte se traduisant par: des lois et les normes rigoureuses, peu clémentes et omniprésentes, qui préservent la qualité des soins prodigués aux patients; la fiabilité opérationnelle maximale des actifs pour permettre un bon retour sur investissement; et un budget restreint qui limite les marges de manœuvre.

1.4 Problématique et Hypothèses

De tout ce qui précède, il ressort que dans toute entreprise, une gestion performante des actifs physiques intelligents repose sur une intégration de toutes les fonctions essentielles de l'entreprise. Parmi ces fonctions, la maintenance est celle qui dicte le niveau de productivité et de performance aux actifs. D'ailleurs, dans certains domaines industriels, les soixante-dix pour cent (70%) des coûts de la production sont attribués à la maintenance (Li, Zhang et Xu, 2012). Il est donc crucial d'adopter une politique de maintenance adaptée au niveau de criticité des actifs afin de maximiser leur fiabilité opérationnelle. Dans cette même optique d'évaluation économique, les entreprises commencent par se rendre compte à l'évidence que les processus de maintenance ont une marge de manœuvre plus large d'optimisation, que celle que peuvent avoir les opérations de maintenance (Jantunen et al., 2011). Il est donc

important d'investir dans le choix d'un processus de maintenance plus optimal au parc d'actifs de l'entreprise dans une considération de coût-avantages et coût-efficacité.

De plus, de nos jours, nombreux sont les industries manufacturières d'actifs complexes tels que les avions, dont la demande croissante des clients se focalise sur une augmentation de la disponibilité de l'actif, sa sécurité opérationnelle, sa durabilité, une réduction des coûts d'exploitation et de maintenance durant le cycle de vie de l'actif, ainsi qu'une facilité de soutien opérationnel et de maintenance en tout temps et indépendamment du site où se trouve l'actif (Oliveira, Araujo et Jardine, 2013).

Nous avons examiné plus haut les nombreux avantages d'une adoption de maintenance prédictive infonuagique qui surpassent de loin ceux pouvant avoir toute autre forme de maintenance. Les coûts de performance pour une maintenance réactive ainsi que pour une maintenance préventive systématique peuvent être très élevés (Verma et Subramanian, 2012). En d'autres termes, la maintenance réactive fait subir la panne et entraîne des conséquences néfastes sur la performance opérationnelle des actifs telles que l'arrêt de la production; les risques en santé et sécurité au travail; les risques de tension relationnelle entre différentes parties prenantes, qui se rejettent les responsabilités mutuelles; des pressions du service de production sur le service maintenance, qui peuvent conduire à des risques de dommages collatéraux (Bo et al., 2012). Quant à la maintenance préventive systématique, en dehors de certains désavantages qui rejoignent ceux de la pratique de la maintenance corrective (arrêt de la production, dommages collatéraux, etc.), elle entraîne un remplacement précoce de composantes des actifs ayant encore des durées de vie utile et induit des coûts supplémentaires inutiles de tâches de maintenance, par opposition à la maintenance prédictive qui intervient juste-à-temps (ni trop tôt, ni trop tard) (Lee et Scott, 2006).

Nous avons également énoncé dans les parties précédentes qu'une bonne prédiction exige une collecte de données suffisantes et de qualité. Or, les progiciels de GMAO et les répertoires de données de surveillances d'état des actifs physiques constituent les sources les plus connues de données de maintenance dans l'entreprise et où les technologies (matériel et

logiciel) en maintenance sont le plus installées. (Galar et al., 2012). En combinant un progiciel de GMAO adéquatement sélectionné (dont le but ultime est de faciliter entre autres la planification et l'ordonnement des tâches de maintenance préventive), avec une bonne technologie fiable de surveillance d'état des actifs capable de permettre d'excellents diagnostics et pronostics de défaillance, on pourrait mettre en œuvre en temps réel un ordonnancement des tâches de maintenance (Björling, 2011).

Plus amplement, les progiciels de GMAO restent des outils précieux de gestion. Selon leur conception, le résultat final des progiciels de GMAO doit se traduire par l'optimisation des temps de bon fonctionnement des actifs, la réduction des coûts de maintenance et l'augmentation de l'efficacité globale de l'entreprise.(Galar et al., 2012). Mais malgré leur performance sur les aspects d'organisation et de planification des tâches (Björling, 2011), les progiciels de GMAO ne sont pas capables de suivre en temps réel l'état de santé des actifs pour faire des prédictions de défaillance ou de vie résiduelle des actifs.(Galar et al., 2012).

À l'opposé, les systèmes de technologies de maintenance prédictive sont très efficaces dans la surveillance d'état des actifs afin d'évaluer les écarts de leur performance par rapport aux performances attendues, et d'aider ainsi à des prises de décisions intelligentes. Par contre, ils sont loin d'être de bons outils de planification et d'ordonnement (Galar et al., 2012). Or, combiner la maintenance prédictive avec l'infonuagique permettrait de résoudre les limitations de la maintenance prédictive en facilitant l'accès à des volumes de données fiables disponibles en temps réel sur l'état de performance des actifs sans investissement notable pour des infrastructures informatiques dispendieuses, de les manipuler facilement.

Ainsi donc logiquement, en combinant la maintenance prédictive infonuagique avec les progiciels de GMAO, on enrichirait ces derniers et on ferait accroître significativement la performance globale de la gestion des actifs de l'entreprise.

Autrement dit, en intégrant des données de maintenance prédictive infonuagique pour alimenter les GMAO, les gestionnaires d'actifs pourront évaluer les performances des actifs

physiques plus facilement, établir de façon comparative leurs performances à celles attendues, faire des prédictions et prendre des décisions rapides de planification et d'ordonnement des tâches en temps réel, rendant la gestion des actifs plus efficace et plus efficiente.

Un autre défi important relevé par l'infonuage dans la gestion des actifs de l'entreprise et qui affecte de façon significative la performance des actifs, est la mise en cohérence temporelle des données disparates issues des sources telles que les répertoires de données de surveillance d'état des actifs et ceux de GMAO, et provenant de plusieurs départements de l'entreprise (Galar et al., 2012). En effet, les données de surveillance d'état des actifs se mesurant en temps réel (en termes de secondes), tandis que les données de cycle de maintenance accumulées dans les répertoires de GMAO se mesurant en temps calendaires (jour, mois, années), il devient difficile d'intégrer les deux silos de données pour leur exploitation efficace (Galar et al., 2012). En ce sens, la centralisation promue par l'infonuage est d'une grande utilité. Galar et al. (2012) ont proposé une architecture pour l'intégration des multitudes de données provenant de sources disparates dans l'industrie, pour leur exploitation en maintenance et pour aider dans les prises de décisions. Cette architecture intègre des progiciels de GMAO combinés avec les systèmes de surveillance d'état des actifs, dans la gestion de maintenance et la gestion des actifs physiques. Lee et al. (2013) pour leur part, ont proposé une méthodologie et un schéma d'un système de maintenance prédictive infonuagique dans l'industrie, dont l'extrait est une offre de service sous forme de pronostic.

Au final, la maintenance prédictive infonuagique semble être la voie novatrice pour relever le défi d'optimiser de façon durable la performance des actifs. Elle est définie pour optimiser l'objectif de la fonction maintenance, qui traditionnellement, doit trouver un compromis entre les coûts de maintenance et les retours sur investissement dictés par la performance opérationnelle des actifs, et ce sans nuire à la sécurité (Macke et Higuchi, 2007). En ce sens, elle optimise les facteurs clés de performance tels que la sécurité, le temps, les coûts, et les ressources regroupés en coût-efficacité de la maintenance, la disponibilité de l'actif et la sécurité opérationnelle qui ont un impact direct sur le niveau de compétitivité de toute

entreprise (Lee et Scott, 2006) (Heng et al., 2009). Elle vient enrichir les fonctionnalités des progiciels de GMAO dont la mission essentielle est de rentabiliser les actifs physiques, mais dont l'implantation et le suivi sont assez dispendieux alors qu'ils peinent à s'adapter aux nouvelles contraintes technologiques de plus en plus présentes dans l'entreprise. Ainsi, la maintenance prédictive infonuagique vient révolutionner la maintenance prédictive traditionnelle qui présente des limitations citées plus haut. Mais, ce nouveau concept de maintenance prédictive infonuagique est encore loin d'être la priorité des gestionnaires d'entreprises qui préfèrent encore s'appuyer sur leurs anciennes habitudes de gestion.

S'il paraît évident que la maintenance prédictive infonuagique ne pourra pas mettre à zéro la probabilité d'occurrence des défaillances, il n'en demeure pas moins que son adoption présente des avantages technico-économiques irréfutables qui devraient vivement inciter les gestionnaires d'entreprises à l'adopter sans retenue.

Par contre, il est essentiel que les gestionnaires d'entreprise soient guidés et soutenus dans leur démarche de changement de politique de maintenance, par un référentiel multicritère technico-économique. Un tel référentiel technico-économique doit permettre de justifier le choix du nouveau concept de maintenance prédictive infonuagique comparativement aux anciennes politiques de maintenance encore en vogue dans l'entreprise, mais qui devront être reléguées au second plan.

Dans cette optique, il est important que les paramètres technico-économiques décrivent les niveaux de performance des actifs physiques soumis à une politique de maintenance corrective, préventive systématique ou prédictive traditionnelle. On pourra alors en déduire, de façon comparative, une trousse d'analyses d'opportunités technico-économiques lorsqu'une politique de maintenance prédictive infonuagique est adoptée.

Par ailleurs, la justification de l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique aux dépens d'une ancienne politique doit s'appuyer sur un contexte de coût-efficacité et de coût avantages. Dans cette optique, certaines études de coûts-efficacité et

coûts-avantages ont été faites pour démontrer les énormes bénéfices réalisés dans l'adoption d'une maintenance prédictive. Pour exemple, Verma et Subramanian (2012) ont démontré dans une analyse de coût-bénéfice, les revenus significatifs générés pour une adoption de maintenance prédictive versus une maintenance curative et préventive systématique, en considérant les facteurs technico-économiques de chaque politique. Le but étant d'inciter les gestionnaires à l'adoption de la maintenance prédictive.

De même, d'énormes bénéfices ont été réalisés dans l'adoption d'une maintenance prédictive au travers de l'application de ses différentes technologies sur le parc d'actifs physiques, par le département fédéral américain pour la gestion de l'énergie (G. P. Sullivan. et al., 2010). Aussi, une autre étude coût-efficacité a permis de prouver comment l'analyse des huiles de refroidissement d'un transformateur de puissance peut réduire les coûts de maintenance tout en la rendant plus efficace; grâce à un pronostic de défaillance basé sur l'utilisation de nouveaux modèles de test de résistance d'isolation moins coûteux que les tests de maintenance traditionnelle de Megger (test de résistance d'isolation) (Ghunem et al., 2012).

Ces cas d'exemples parmi tant d'autres, illustrent les avantages de l'adoption d'une politique de maintenance prédictive qui peuvent être amplifiés par un hébergement dans l'info nuage. En outre, ils décrivent certains critères clés d'évaluation technico-économique sur lesquels peut se baser l'examen efficace de changement de politique de maintenance.

Dans cette même logique, nous avons énuméré plus haut les différents avantages de l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique qui couvrent les champs suivants: *la conception des actifs physiques, la production, le plan opérationnel, la logistique, la maintenance, le cycle de vie de l'actif en général.*

De même, nous avons identifié quatre dimensions de base suivant lesquelles la maintenance prédictive infonuagique est jaugée par rapport aux autres formes traditionnelles de maintenance. Ces quatre dimensions de base sont *les coûts, la sécurité, les ressources et le temps.* Ce sont les jalons sur lesquels s'appuient les différentes catégories d'avantages ci-dessus cités. Une identification et une extraction de listes de critères technico-économiques

détaillés en se basant sur les quatre dimensions à travers les différents champs d'avantages de la maintenance prédictive infonuagique, peuvent permettre de définir un référentiel multicritère technico-économique pouvant guider les gestionnaires dans leur choix de changement de politique de maintenance.

Précisons que, si les facteurs technico-économiques décrivant de bons rapports coût-efficacité et coût-efficience sont bien élucidés, les gestionnaires de maintenance seront éclairés et pourront saisir cette aubaine d'adoption d'une solution de maintenance prédictive infonuagique.

Cependant, il convient de préciser que l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique exige une organisation rigoureuse préalable de la gestion de la maintenance dans l'entreprise et son application ne devrait cibler que les actifs les plus critiques. Une démarche contraire risquerait de mettre en péril le projet de changement de politique de maintenance.

De plus, compte tenu des diverses responsabilités dans l'entreprise, les débuts de réflexion sur la question de changement de politique de maintenance se basant sur le référentiel multicritère technico-économique doivent être la responsabilité conjointe des chefs de maintenance, de la production et de la logistique. Une fois que ces derniers sont convaincus de l'opportunité qui s'offre à eux (*business case*), alors ils devront vendre la nouvelle politique au plus haut niveau.

Enfin, une cohorte des indicateurs de performance après un changement de politique de maintenance serait nécessaire pour évaluer, valider ce choix et au besoin le raffiner par une politique de maintenance basée sur la fiabilité afin de remédier à d'éventuelles imperfections.

Dans les chapitres suivants, nous allons examiner les concepts utiles entrant en ligne de compte de cette nouvelle politique de maintenance prédictive infonuagique et nous allons concevoir un référentiel technico-économique pour répondre à une telle préoccupation.

1.5 Méthodologie d'approche de solution

Dans ce dernier point du premier chapitre de ce mémoire nous nous proposons une méthodologie d'approche de solution dont les principaux développements porteront de façon succinct sur :

- Un cadrage des concepts d'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique. Par ce cadrage conceptuel, nous ferons une analyse de l'évolution de la maintenance afin de mieux situer la maintenance prédictive infonuagique et par rapport aux autres formes de maintenance mais aussi d'établir des liens éventuels entre elles. Étant entendu que la politique de maintenance prédictive s'appuie sur des technologies qui lui sont propres, nous analyserons les différentes technologies utilisées en maintenance prédictive ainsi que leurs différentes applications sur la maintenance des actifs. La corrélation entre plusieurs technologies de maintenance prédictive sera explorée dans le but de montrer l'apport d'une telle considération dans le raffinement des diagnostics et des pronostics de défaillances.

Le cas particulier de l'application de la maintenance biomédicale et hospitalière sera abordée plus particulièrement dans son application sur les systèmes de tomodensitomètres encore appelés les systèmes de scannographie à rayon-x.

Les avantages de la maintenance prédictive infonuagique impactent non seulement la gestion des actifs physiques en général mais particulièrement ils permettent d'enrichir les fonctionnalités des progiciels de GMAO. C'est pourquoi nous analyserons et résumerons les différentes fonctionnalités des GMAO. Aussi, afin de s'assurer de cet impact de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques, il sera nécessaire d'examiner la nécessité de mesurer la performance de la fonction maintenance au sein de l'entreprise. Nous donnerons un exemple pratique d'une solution offrant la maintenance prédictive infonuagique pour lequel d'ailleurs ce projet de mémoire a été initié.

Enfin, face à la réticence des entreprises à l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique, nous verrons comment justifier le choix d'une politique et stratégie de maintenance afin d'éclairer d'une part les concepteurs de solution offrant la maintenance prédictive infonuagique face aux responsables de maintenance et de production au sein des entreprises clientes, d'autre part éclairer les responsable de maintenance dans leur démarche de convaincre la haute direction de leur entreprise d'un choix de politique et stratégie de maintenance dont ils sont convaincus.

- Une élaboration d'une trousse technico-économique pour outiller les concepteurs leur permettant de promouvoir et vendre leur solution. Puisque la maintenance prédictive infonuagique est une forme très évoluée de maintenance, elle ne peut s'appliquer à n'importe quel module d'actifs de n'importe quelle entreprise. C'est pourquoi nous définirons des critères de qualification des entreprises ainsi que des niveaux de criticité des actifs ainsi que de leurs constituants en nous basant sur le principe suivant : appliquer la maintenance prédictive infonuagique sur un module ou un composant critique d'un actif critique sélectionné dans une entreprise qualifiée. Nous proposerons ensuite un chemin décisionnel succinct de choix de politique de maintenance prédictive infonuagique mettant en exergue les fonctions telles que l'âge et le taux de défaillance. Par ailleurs, le but des solutions offrant la maintenance prédictive infonuagique étant d'agir sur les processus de maintenance, nous proposerons un schéma succinct décrivant les processus de maintenance.

Enfin, en prélude à la conception du contenu d'un référentiel technico-économique pouvant permettre d'évaluer ou de mesurer, de suivre et d'améliorer éventuellement la performance de la fonction maintenance au sein de l'entreprise, nous allons définir les aspects techniques et économiques de la fonction maintenance ainsi que les rapports coûts-efficacité et coût-avantage afin de définir quelques indicateurs de maintenance que nous allons distribué dans un tableau. Ce tableau qui représente le référentiel technico-économique sera fait d'une matrice avec en ligne les déterminants : sécurité, coûts, temps et ressources; et en colonnes les différentes composantes de la gestion des actifs telles

que la production, la santé et sécurité, les opérations, la logistique et la gestion des stocks, le design, etc. et même la GMAO.

- Dans le dernier point de notre démarche, nous allons proposer aux concepteurs de solutions offrant la maintenance prédictive infonuagique des outils pour les études de marché ainsi que des techniques de vente afin de les aider à mieux promouvoir et vendre leurs produits et services. Enfin, nous proposerons des grilles d'évaluation afin de pondérer l'impact de notre trousse d'opportunités technico-économiques conçue sur la compréhension des hypothèses de départ. De façon plus précise, les critères à pondérer sont: la compréhension des problèmes de non-adoption de la maintenance prédictive infonuagique par les entreprises, la présentation et l'explication des avantages de la maintenance prédictive infonuagique, l'adéquation entre ces premiers critères, enfin la justification de l'implantation de toute solution offrant la maintenance prédictive infonuagique pour les entreprises. Pour finir, nous examinerons les limites de notre démarche et des éléments pouvant servir pour de futures recherches.

Résumé du premier chapitre

À travers ce premier chapitre, nous avons défini dans un premier temps les meilleures pratiques de gestion des actifs physiques en nous inspirant de la démarche recommandée par le PAS 55-2. Nous avons décrit les différents types d'actifs et énuméré suivant une vue holistique les principales dimensions sur lesquelles toute gestion d'actif ou système d'actifs doit se baser. Ensuite, nous avons passé en revue les éléments interdépendants à prendre en compte dans le système de gestion des actifs. La politique, la stratégie ainsi que les objectifs du système de gestion d'actifs découlent directement de la stratégie et les objectifs globaux de l'entreprise. Un accent a été mis sur le lien naturel entre performance et risque, mais aussi entre criticité d'un actif et le choix adéquat d'une politique de maintenance proactive qui permet de surveiller en temps réel l'état des performances et d'exécuter les opérations d'amélioration nécessaire de façon anticipée. Aussi nous avons vu qu'une révision de gestion peut suggérer un changement de stratégie ou d'objectifs. Enfin, nous avons décrit comment pérenniser la performance du système de gestion d'actifs, et énoncé que la maintenance reste «le cœur de la gestion d'actifs», mais qu'elle est inséparable des autres éléments du système de gestion d'actifs auxquels elle est intimement liée.

Dans un second plan, nous avons examiné la définition d'un nouveau concept de maintenance pour les actifs physiques intelligents. Nous avons expliqué le concept d'E-maintenance qui englobe entre autres la maintenance prédictive et la GMAO. Ensuite, nous avons exploré les divers avantages de l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique contre les inconvénients et les limitations des anciennes politiques de maintenance corrective, préventive systématique et prédictive traditionnelle. Nous avons également montré comment l'enrichissement de la GMAO par la maintenance prédictive infonuagique est un outil d'optimisation certaine de performance des actifs, et d'une grande nécessité pour les gestionnaires d'entreprises. Cependant, avec la réticence des gestionnaires d'adopter la politique de maintenance prédictive pour enrichir leur logiciel de GMAO, une réflexion a été faite sur une approche les considérations technico-économiques basées sur les concepts d'évaluation coût-efficacité et coût-avantages, dans l'adoption d'une maintenance

prédictive infonuagique. Le but a été d'examiner comment aider les gestionnaires de maintenance et d'entreprises à comprendre le bienfondé de l'adoption de cette nouvelle politique de maintenance, clé de solution optimisée de compromis entre coûts de maintenance et coûts de performance opérationnelle de leurs actifs.

Dans le prochain chapitre, nous allons analyser les concepts utiles dans l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique.

CHAPITRE 2

CADRAGE CONCEPTUEL DANS L'ADOPTION D'UNE MAINTENANCE PRÉDICTIVE HÉBERGÉE DANS L'INFONUAGE

Dans notre démarche d'analyse de solutions possibles aux problématiques et hypothèses posés dans le premier chapitre de ce mémoire, il est nécessaire de cadrer les concepts utiles devant être considérés dans l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique. L'analyse de ces concepts représente le contenu de ce deuxième chapitre.

2.1 Évolution des différents types de maintenance

La maintenance est un «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» (AFNOR, 2002).

La maintenance a connu une évolution graduelle au fil des ans, passant d'une maintenance exécutée après avoir subi la défaillance à une maintenance exécutée en vue de prévenir la défaillance, ou encore d'améliorer la conception des actifs. Plusieurs concepts sont même développés de nos jours pour inciter à concevoir des actifs qui pourront s'auto-maintenir, et ne nécessitant plus, ou du moins réduisant considérablement toute intervention humaine externe majeure. La figure 2.1 ci-dessous montre les différentes formes de maintenance les plus connues dans l'entreprise ainsi que leur niveau d'efficacité et d'efficience (c'est-à-dire leur niveau de performance) dans la gestion des actifs de l'entreprise. La figure 2.2 montre l'évolution progressive du développement des technologies de maintenance. Au bas de l'échelle se trouve une situation de non maintenance qui peut se traduire par une inexistence des ressources nécessaires pour accomplir les tâches de maintenance ou par le fait que les coûts dispendieux de maintenance de certains actifs donnent une préférence de conception de ces derniers de manière à être disposés lorsqu'ils sont défaillants (Lee et Scott, 2006).

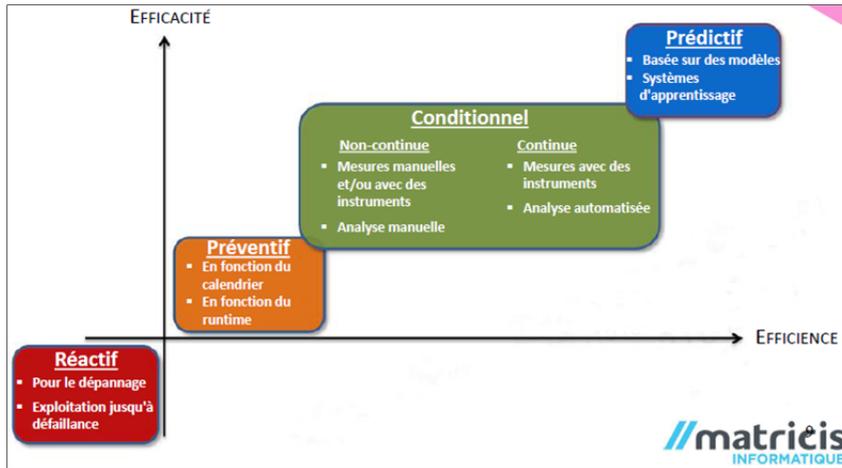


Figure 2.1 Aperçu des fonctionnalités de la Solution //m⁴
Tirée de (Ouellet (2013), p.9)

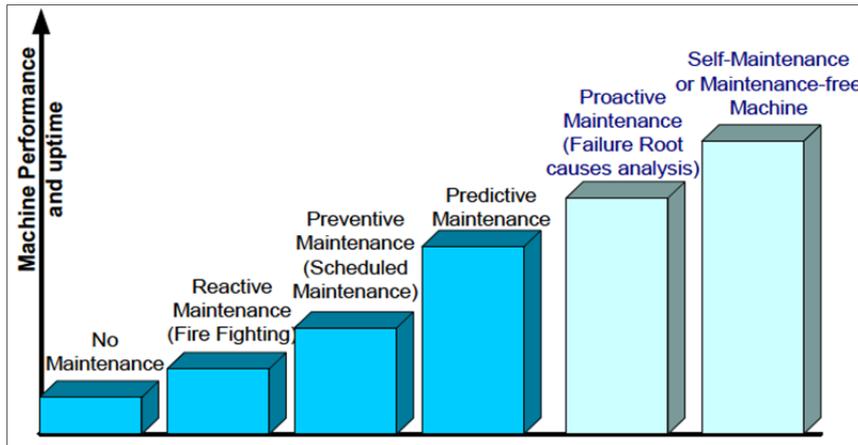


Figure 2.2 Évolution de la maintenance
Tirée de (Lee et Scott (2006), p.2)

La fonction maintenance au sein de l'entreprise a longtemps été considérée comme un sous département de la production. Mais, une bonne fonction de maintenance contemporaine, doit être une fonction autonome dont la gestion doit épouser les recommandations du PAS-55 en matière de gestion des actifs physiques. Choisir une politique de maintenance adéquate est loin d'être une tâche facile car elle intègre des composantes complexes (caractéristiques et fiabilité conceptuelle, données de fiabilité opérationnelle, le niveau de criticité des actifs, leur

nombre et leur type, les ressources de maintenance, la politique et la stratégie de l'entreprise, etc.), dont l'analyse rigoureuse est nécessaire durant la durée de vie des actifs. Logiquement, pour les systèmes à dégradation graduelle décrivant la courbe en baignoire (figure 2.3 ci-dessous), il est nécessaire de trouver un compromis entre toutes les méthodes de maintenance afin que celle qui est adoptée soit optimale. Même si la maintenance réactive est moins recommandée par rapport à ses désavantages comparativement aux autres formes de maintenance, il n'en demeure pas moins qu'elle ait son pourcentage d'application puisque la défaillance reste un évènement aléatoire dont la probabilité d'occurrence ne peut être nulle. Pour la plupart des composants électroniques, il n'y a pas usure (dégradation graduelle) pendant leur utilisation comme dans le cas des composants mécaniques, car ils sont soumis à un vieillissement accéléré au moment de leur conception. Ainsi, leur taux de défaillance reste constant durant leur durée de vie et correspond à la portion de la courbe en baignoire pour la durée de vie utile des composants mécaniques.

Cependant, il est toujours indiscutable que prévenir les défaillances soit l'option recommandée.

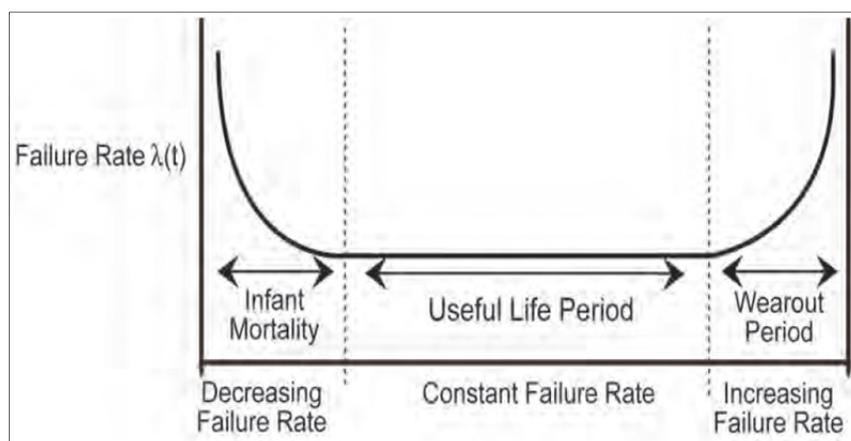


Figure 2.3 Courbe en baignoire
Tirée de (G. P. Sullivan. et al. (2010), p.49)

2.1.1 La maintenance réactive ou la maintenance corrective

Pendant longtemps, la politique de maintenance adoptée par les entreprises a été celle d'intervenir après la défaillance constatée de l'actif ou après que sa fonction soit altérée. Il faut donc attendre la défaillance avant de planifier les actions correctives pour y remédier. Les types de maintenance réactive ou corrective sont la maintenance palliative (dépannage) et la maintenance curative (réparation). Selon AFNOR, la maintenance corrective est «une maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.» (AFNOR, 2002).

Avec l'analyse de la courbe en baignoire, les actifs physiques à dégradation graduelle (mécaniques et électromécaniques), lorsqu'ils passent avec succès la période de rodage (ou de mortalité infantile), ils présentent une fiabilité opérationnelle maximale (suivant des conditions opérationnelles optimales) pendant leur durée de vie utile. Au cours de cette période de leur cycle de vie qui est normalement la plus longue, les gestionnaires de maintenance auront tendance à adopter une politique de maintenance corrective. D'ailleurs, plus de 55% des activités en maintenance au sein entreprises de taille moyenne aux États-Unis, sont correctives (G. P. Sullivan. et al., 2010). Cependant les conséquences d'une telle méthode de maintenance, peuvent être catastrophiques pour l'entreprise qui peut encaisser de lourdes pertes. Les entreprises de grande importance peuvent disposer de nos jours d'un nombre impressionnant d'actifs à maintenir. Chercher à intervenir sur les actifs après avoir subi les pannes demanderait un nombre impressionnant de personnel d'entretien, ce qui est contraire à la politique de l'entreprise qui vise à optimiser les ressources. Après les années 1980, le souci majeur des entreprises était de sortir du cercle vicieux de la maintenance corrective (autrefois désignée «entretien» qui réduisait le rendement de la production tout en voulant accroître le nombre du personnel d'entretien ((Monchy et Vernier, 2010) , p.17).

Ainsi, une première conséquence directe d'une politique de maintenance corrective est le besoin en ressources humaines en nombre important (cadres, gestionnaires et personnel d'entretien etc.) pour gérer la situation débordante de la défaillance subie des actifs, ou à défaut de surcharger le personnel d'heures supplémentaires ou de tâches interminables. C'est un gaspillage de temps dont la charge horaire implique des coûts importants.

De même la sécurité aussi bien opérationnelle que du personnel de maintenance se trouve grandement affectée. De plus, le caractère fortuit de la défaillance et la réalisation des tâches de maintenance corrective impliquent un stock de pièces de rechange important parfois non raisonnable afin de prévenir une pénurie éventuelle. C'est une immobilisation de coûts et une complication de la gestion du stock des pièces de rechange dont le seuil d'alerte est difficile à fixer.

D'autres conséquences directes de la maintenance corrective se traduisent par les coûts liés à une sollicitation d'une sous-traitance à cause de la main d'œuvre non qualifiée par rapport à l'ampleur de la défaillance. Les démontages et les remontages de composantes défaillantes peuvent induire des dommages collatéraux et entraîner des coûts supplémentaires de maintenance et une immobilisation prolongée de l'actif.

Les conséquences indirectes d'une politique de maintenance corrective sont les pertes de production souvent très dispendieuses dans les industries lourdes et dues à l'immobilisation et l'indisponibilité des actifs. Une perte de production peut être entraînée par l'impossibilité de livrer des produits ou des services à temps, la livraison de produits ou des services de mauvaise qualité. L'image de l'entreprise se trouve donc entachée et son niveau de compétitivité anéantie.

En somme, il serait peu recommandé d'adopter une politique de maintenance réactive, mais cette forme de maintenance ne peut disparaître. Par exemple, pour certains actifs, la défaillance peut ne pas avoir une répercussion majeure sur la production ou le service rendu par l'entreprise, et peuvent dans ce cas être soumis à une maintenance corrective. De même, certains actifs de par leur conception, peuvent être non réutilisables après défaillance. Dans ces cas, une maintenance réactive peut être plus avantageuse. Il est donc nécessaire de faire un audit ou du moins un diagnostic de la fonction maintenance de l'entreprise afin de prioriser ou non, pour chaque actif et parc d'actifs, la maintenance corrective par rapport à d'autres formes de maintenance.

2.1.2 La maintenance préventive systématique

La forme immédiate de maintenance permettant de sortir du cercle vicieux de la maintenance corrective, est celle permettant d'exécuter des tâches de maintenance de façon préventive systématique. La maintenance préventive systématique est définie comme étant une: «maintenance préventive 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.» (AFNOR, 2002). Autrement dit, la maintenance préventive systématique permet de prévenir les défaillances des actifs par une exécution de tâches de maintenance suivant un temps calendaire ou suivant un compteur d'usage (nombre de tours ou le kilométrage). Cette méthode se fait de façon systématique et ne tient pas du tout compte de l'évaluation de l'état de l'actif durant son cycle de vie.

Suivant la courbe de de taux de défaillance, le taux de défaillance étant élevé pendant la période de rodage et pendant la période de vieillissement de l'actif, une maintenance préventive systématique de périodicité rapprochée pourrait à priori être avantageuse sans toutefois garantir une élimination des défaillances. Mais pendant la période de vie utile de l'actif qui est normalement la plus longue, le taux de défaillance est le plus faible et une maintenance systématique peut ne pas être appropriée. Une intervention préventive systématique implique un maintien d'un stock de pièces de rechanges disponibles pour permettre l'exécution des tâches de remplacement systématiques. Mieux, un tel remplacement systématique et «aveugle» des pièces ne tenant pas compte de leur état d'usure peut être un gaspillage pour la plupart d'entre elles qui ont encore une durée de vie utile. Aussi, au cours de l'exécution des tâches de maintenance préventive systématique, le démontage de certaines composantes et leur remontage peuvent entraîner des dommages collatéraux induits par le personnel de maintenance comme dans le cas de la maintenance corrective. Cependant, la maintenance préventive systématique permet de réaliser un rapport coût-bénéfice comparativement à une politique de maintenance réactive. Les coûts de maintenance économisés en maintenance préventive systématique par rapport à une maintenance corrective sont de l'ordre de 12% à 18%.((G. P. Sullivan. et al., 2010), p.51). Le fait de disposer d'un échéancier d'exécution des tâches de maintenance préventive permet

une meilleure planification des tâches de maintenance. Et la maintenance préventive systématique peut rallonger la vie des actifs mais elle est loin d'éliminer les défaillances catastrophiques. Aux États-Unis, le taux d'activités de maintenance préventive exécutées dans les entreprises de taille moyenne s'élève à 31% et représente la deuxième méthode de maintenance la plus adoptée après la méthode de maintenance réactive ((G. P. Sullivan. et al., 2010), p.50).

Notons tout de même qu'une analyse de l'historique des actifs pendant leur cycle de vie, peut suggérer une réduction des intervalles des interventions systématiques sans toutefois tenir compte de l'état de l'actif. Intuitivement, la forme de maintenance née en réponse à la maintenance préventive systématique, est une maintenance préventive basée sur «une condition d'état» de l'actif, signe précurseur d'une défaillance. C'est l'essence de la maintenance préventive conditionnelle.

2.1.3 La maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle ou tout simplement la maintenance conditionnelle, est une «maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent; la surveillance du fonctionnement et des paramètres pouvant être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue.» (AFNOR, 2002).

Les défaillances graduelles sont toujours annoncées par des signes précurseurs. Le principe de la maintenance conditionnelle est donc de détecter ces signes révélateurs d'une déviation par rapport à une valeur nominale définie lors de la conception de l'actif ou de ses composantes, et pouvant évoluée durant son cycle de vie. Une telle manière de procéder permet de planifier à temps sans nuire à la production, des tâches de maintenance préventive avant que ne survienne la défaillance.

La maintenance préventive conditionnelle facilite une meilleure gestion de stock de rechange comparativement à la maintenance corrective et systématique. De plus, le fait de détecter très

tôt des signes révélateurs d'une dégradation graduelle, la durée de vie utile de l'actif peut être rallongée en permettant de mieux maîtriser les périodes de haut taux de défaillance (mortalité infantile et vieillesse). En outre, les tâches de maintenance peuvent être planifiées en toute sérénité; les temps d'arrêts des actifs sont écourtés au profit d'une optimisation de la production.

Les technologies déployées en politique de maintenance conditionnelle sont identiques à celles utilisées dans les contrôles non destructifs (CND) telles que les analyses de vibrations, la thermographie infrarouge, les ultrasons, la radiographie, l'analyse des huiles, etc. L'application d'une technologie ou d'une autre dépend de la nature du paramètre d'état de l'actif à surveiller. Ainsi, la technologie de la maintenance conditionnelle sera choisie selon qu'il s'agisse d'une grandeur mécanique, thermodynamique, électromagnétique, optique etc. La définition des tâches de maintenance en maintenance conditionnelle est basée en général sur un seuil de décision du paramètre d'état dont une analyse minutieuse permet de conclure en une déviation par rapport à une valeur nominale. Il est à noter que même si le seuil de décision permet d'éviter la survenue d'une défaillance, une association de plusieurs seuils de décision de plusieurs technologies et des données opérationnelles de l'actif (aspect multidimensionnel), peut aider à raffiner les diagnostics de défaillances à prévenir.

En somme, la maintenance conditionnelle permet une meilleure gestion des ressources en maintenance car la planification des tâches se fait en toute sérénité. La gestion des stocks est plus optimale car seules les composantes nécessaires sont gardées en stock ou commandées juste à temps. De plus, du fait que la planification des tâches se fait de façon plus aisée, le facteur sécurité est maîtrisé et les normes et réglementations sont rigoureusement respectées et intégrées dans les processus d'exécution des opérations de maintenance. Une analyse des données d'état des actifs collectées ainsi que des historiques de défaillance peuvent permettre d'établir d'éventuelles nouvelles instructions d'utilisation des actifs au profit d'une optimisation de la production et d'une fiabilité opérationnelle.

Malgré tous ces avantages ci-dessus cités, la maintenance conditionnelle ne fait pas de prévisions ou de pronostic extrapolés des défaillances ou encore une estimation de durée de vie résiduelle d'une composante d'un actif. Cette fonction est la principale force d'une autre forme de maintenance conditionnelle dite prévisionnelle.

2.1.4 La maintenance prévisionnelle ou prédictive

La maintenance prévisionnelle ou maintenance prédictive est une: «maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.» (AFNOR, 2002).

La maintenance prévisionnelle permet donc de prédire la prochaine défaillance par extrapolation de l'analyse de l'évolution des écarts de performance observés. En d'autres termes, la maintenance prévisionnelle permet de déterminer la durée de vie résiduelle d'un actif. Cette caractéristique de la maintenance prévisionnelle est d'une immense richesse pour une gestion optimale du cycle de vie des actifs.

En dehors des avantages cités pour la maintenance conditionnelle, non seulement la maintenance prévisionnelle permet de prédire la prochaine défaillance, mais elle permet également de prédire le remplacement éventuel de la composante de l'actif ou de l'actif lui-même. Mieux en sachant avec précision la date de la prochaine défaillance, des actions correctives peuvent être prises en toute sécurité sans nuire à la production, une réduction des durées d'indisponibilité des actifs est effective, et la durée de vie utile de l'actif est optimisée. De même les données de prédictions peuvent être introduites dans la phase de conception de l'actif afin d'augmenter aussi bien sa fiabilité intrinsèque (de conception) que sa fiabilité opérationnelle. Le résultat est une productivité accrue à moindres coûts et une meilleure qualité des produits et de services rendus. Le respect des normes de sécurité d'utilisation ainsi que de la protection de l'environnement devient plus aisé par une extrapolation de la comparaison entre les données de surveillance des actifs confrontée aux réglementations ou aux normes pour conclure éventuellement en un écart notable.

La démarche de la maintenance prédictive se traduit par la détection de l'écart du paramètre sous surveillance, le diagnostic, le pronostic et le pronostic après la réalisation des tâches de maintenance. Une économie de 8 à 12% sur les coûts de maintenance est réalisée avec une politique de maintenance prévisionnelle comparativement à la maintenance préventive systématique. ((G. P. Sullivan. et al., 2010), p.52).

En récapitulant les avantages d'une adoption de maintenance prédictive G. P. Sullivan. et al. (2010) estiment que les cinq avantages directs sont les suivants :

- La maintenance prédictive permet jusqu'à dix fois le retour sur investissement;
- Une réduction 25% to 30% des coûts de maintenance;
- Une élimination des pannes de 70% à 75%;
- Une réduction du taux d'arrêt ou d'indisponibilité des machines de 35% à 45%;
- Une croissance de la production de 20% à 25%.

Malgré tous ces avantages, la maintenance prévisionnelle seule une proportion de 12% des tâches de maintenance est attribuée à cette forme de maintenance dans la plupart des entreprises de taille moyenne aux États-Unis ((G. P. Sullivan. et al., 2010), p.50). Ce constat est sans doute dû au fait que les bénéfices de la maintenance prévisionnelle sont encore peu connus des gestionnaires des entreprises. Mais aussi à cause de certains désavantages tels que les coûts dispendieux d'installation et de maintenance d'infrastructures informatiques ainsi que les frais de formation du personnel de maintenance; tous deux nécessaires à la mise en place d'une telle politique. Ainsi, seuls les actifs critiques tels que ceux ayant un coût de maintenance et d'indisponibilité très élevés ou encore ceux ayant un impact majeur sur la santé et la sécurité devront être ciblés pour subir une maintenance prévisionnelle.

2.1.5 La maintenance proactive

La maintenance proactive est une forme de maintenance au processus dynamique dont l'objectif principal est de détecter les défaillances avant leur survenue, mais aussi de prendre les actions de maintenance adéquates pour empêcher leur occurrence.

Elle peut être décomposée en quatre étapes principales qui commencent par la mise en place d'une maintenance prédictive, ensuite le diagnostic et l'analyse des causes de défaillances, la correction des indicateurs de performance (KPI) et enfin une revue opérationnelle (SKF, 2005). C'est donc une maintenance en temps réel ayant pour but de prolonger la durée de vie des actifs en détectant à temps la prochaine défaillance, d'analyser leurs causes et leurs origines, de prendre les actions correctives qui s'imposent afin de conserver la performance des actifs proche des indicateurs de performance établis et enfin de réviser tout le processus pour permettre une éventuelle amélioration.

La maintenance prédictive est donc une composante à part entière de la maintenance proactive. Elle en constitue la première phase. Mais l'analyse comportementale des actifs durant leur cycle de vie dont les indicateurs de performance peuvent révéler une perte d'efficacité, nécessite d'autres informations importantes. En ce sens, un historique de fonctionnement et une bonne gestion de précieuses données recueillies au cours de la surveillance de l'état de fonctionnement des actifs sont entre autres nécessaires à une meilleure prise de décision.

Il est donc essentiel de raffiner la maintenance proactive par une maintenance basée sur la prise en compte globale de la fiabilité des actifs tout au long de leur cycle de vie afin de confirmer ou d'infirmer le choix de la politique de maintenance à laquelle les actifs sont soumis. Cette forme de maintenance est la maintenance basée sur la fiabilité qui est une forme de maintenance rétrospective par opposition à la maintenance proactive qui est plutôt prospective.

2.1.6 La maintenance basée sur la fiabilité (MBF)

AFNOR décrit la MBF comme étant une méthode d'aide au choix d'alternatives de maintenance et pour éclairer les décisions de choix de maintenance (AFNOR, 2002). Lorsqu'une politique de maintenance préventive est adoptée pour des actifs physiques, la méthode MBF permet de faire une rétrospective des défaillances, d'utiliser des arbres décisionnels (AMDEC, arbres de défaillances, HAZOP etc.) pour définir et analyser leurs

causes et origines ainsi que leurs modes d'occurrence. Ensuite, d'analyser et définir quels types de tâches de maintenance préventive permettront de limiter ou d'éradiquer les défaillances. Et enfin, de faire une analyse technico-économique permettant de s'assurer que toutes les actions de maintenance exécutées s'inscrivent dans un contexte de maintenance optimale, afin de les améliorer ou de les corriger au besoin. La MBF est une méthode qui permet de raffiner et de justifier sur le plan technico-économique le bon choix d'une politique de maintenance préventive.

2.1.7 La maintenance productive totale (TPM)

La méthode TPM est une méthode de maintenance née du concept suivant lequel la performance des actifs est la base de l'optimisation des coûts, de la productivité, de la sécurité, de la qualité, de l'inventaire, des extrants de la production (Ravishankar, Burczak et De Vore, 1992; SKF, 2005).

Loin d'être une méthode de maintenance facile à mettre en place, elle repose sur huit piliers qui sont: les 5S (Aménagement des postes de travail) (du Japonais: Seiri, Seiton, Seisio, Seiketsu, Shitsuke), une maintenance autonome, Kaizen (amélioration continue), une maintenance planifiée, une maintenance de qualité, la formation et le perfectionnement, la TPM administrative (administration), la Santé-sécurité et l'environnement. (Wakjira et Singh, 2012).

Notons que les terminologies nipponnes se traduisent comme suit :

- Seiri : épuration des postes de travail des articles non nécessaires,
- Seiton : mettre en ordre les articles nécessaires pour faciliter leur utilisation,
- Seisio : nettoyer et rendre les postes de travail rigoureusement insalubres,
- Seiketsu : standardiser l'organisation des postes de travail,
- Shitsuke : former et motiver le personnel au maintien de façon autonome et descente pour les postes de travail, (Wakjira et Singh, 2012).

La TPM est donc une approche proactive qui donne une place privilégiée à la maintenance dans le processus de la production dans le but d'accroître la performance des actifs et de

permettre à l'entreprise de rester compétitive. Mais accroître la disponibilité et la performance des actifs pour optimiser la production n'est pas forcément synonyme de garantir une meilleure qualité pour une production en masse. C'est pourquoi Nakajima en 1988 a défini le concept du taux de rendement synthétique (**TRS** de l'anglais **OEE** : Overall equipment effectiveness), qui est le produit des facteurs **Disponibilité, Performance et Qualité**, et qui permet d'évaluer l'efficacité des actifs par identification des pertes de production et les coûts cachés indirects induits. (Garza-Reyes et al., 2010).

2.1.8 L'e-maintenance

L'e-maintenance est une forme globalisée de l'utilisation des technologies de l'information et de communication (TIC) au service de la fonction maintenance. Suivant son contexte d'application elle est parfois considérée comme système de gestion de maintenance, comme des méthodes et moyens de maintenance ou encore comme un outil de support à la maintenance. (Borissova et Mustakerov, 2013). Elle a donc pour objectif d'intégrer les technologies de l'information et de communication pour développer un système de soutien efficace et efficient à la maintenance des actifs durant leur cycle de vie par une maintenance bien structurée et organisée. (Tsang et al., 2006). Elle est une extension de la télémaintenance. Le concept d'e-maintenance a vu le jour depuis des décennies avec l'introduction des TIC en gestion de maintenance. Les récents développements des technologies de l'information et de la communication définissant la maintenance prédictive hébergée dans l'info nuage, permettent d'inclure cette dernière à part entière au concept de l'e-maintenance. De même, elle intègre plusieurs composantes de gestion des actifs telles que: les GMAO, la gestion de la connaissance, etc.

2.1.9 La maintenance hébergée dans un environnement infonuagique

La maintenance hébergée dans un environnement infonuagique représente une forme moderne de la gestion de maintenance. Quel que soit le type de politique de maintenance adoptée par l'entreprise, le nouveau concept de gestion des actifs recommandé par le PAS 55 pour optimiser la performance des actifs, montre qu'il est nécessaire que toutes les ressources de l'entreprise (du simple agent d'entretien à l'expert en gestion) et éventuellement des

clients de l'entreprise, collaborent en partageant les données dont le volume impressionnant exige un stockage et une sauvegarde flexible et sécuritaire.

En outre, l'introduction des technologies de l'information et de télécommunication ainsi que la mise en place de serveurs de sauvegarde de volumes grandissants de données (matériel et logiciel d'application) créent une plateforme informatique dispendieuse. En hébergeant la gestion de la maintenance dans un environnement infonuagique, la plateforme informatique dispendieuse est éliminée tandis le caractère extensible de l'info nuage permet une flexibilité de gestion de la pléthore des bases de données de maintenance. L'info nuage permet une centralisation des données et facilite ainsi une meilleure collaboration entre les différentes ressources de l'entreprise, une rapidité de traitement des informations, un accès à distance de façon sécuritaire.

Les trois concepts de l'info nuage sont l'IaaS (Infrastructure service ou en anglais Infrastructure as a Service), le PaaS (Plateforme service ou en anglais Platform as a Service) et le SaaS (Logiciel service ou en anglais Software as Service); aussi l'infrastructure infonuagique peut être publique, privée ou hybride (semi-publique et semi-privée) (Zhipeng et Aiping, 2011).

2.1.10 L'auto-maintenance

La figure 2.2 (citée au début du présent chapitre) montre l'auto-maintenance (ou en anglais maintenance free machine ou self maintenance) sur un palier supérieur. Ce type de maintenance traduit le concept suivant lequel les actifs sont devenus aussi intelligents qu'ils peuvent s'auto-maintenir.

L'auto-maintenance applicable en ingénierie mécanique en réponse à la complexité grandissante des actifs physiques de plus en plus intelligents, est inspirée à la fois du système immunitaire biologique et du système nerveux humain et doit avoir pour propriétés essentielles: la fiabilité, la robustesse, la résistance et l'autonomie (Lee, Ghaffari et Elmeligy, 2011). Intégrée à la conception technologique de l'actif, la fonction auto-maintenance permet à l'actif d'auto détecter et prédire les défaillances futures, de les diagnostiquer et

d'exécuter de façon autonome les actions correctives requises pour contrer ces prochaines défaillances. Les actions correctives peuvent inclure aussi bien un changement de auto-configuration de l'actif ou de son environnement en s'adaptant au changement des conditions environnementales dans lesquelles l'actif est installé. À priori, une telle forme de maintenance pourrait avoir un bon rapport coût-avantages par élimination des ressources nécessaires à l'exécution de certaines tâches de maintenance mais sa performance devra être examinée plus en profondeur et plus rigoureusement.

2.1.11 Autres types de maintenance

Étant entendu que la maintenance s'apparente de nos jours à une science au cœur des autres sciences et technologies, elle évolue en permanence. La liste des types de maintenance ci-dessus est donc loin d'être une liste exhaustive. Par exemple la maintenance dite *maintenance améliorative* décrit une forme de maintenance qui consiste à modifier un actif ou ses sous-ensemble en vue d'améliorer sa fiabilité, sa maintenabilité, sa disponibilité ou sa sécurité (Barbat et al., 2013). De même d'autres nouveaux concepts de maintenance feront sans aucun doute leur apparition dans les années à venir avec d'autres formes évoluées de politiques et de stratégies de gestion et en fonction de l'évolution scientifique et technologique.

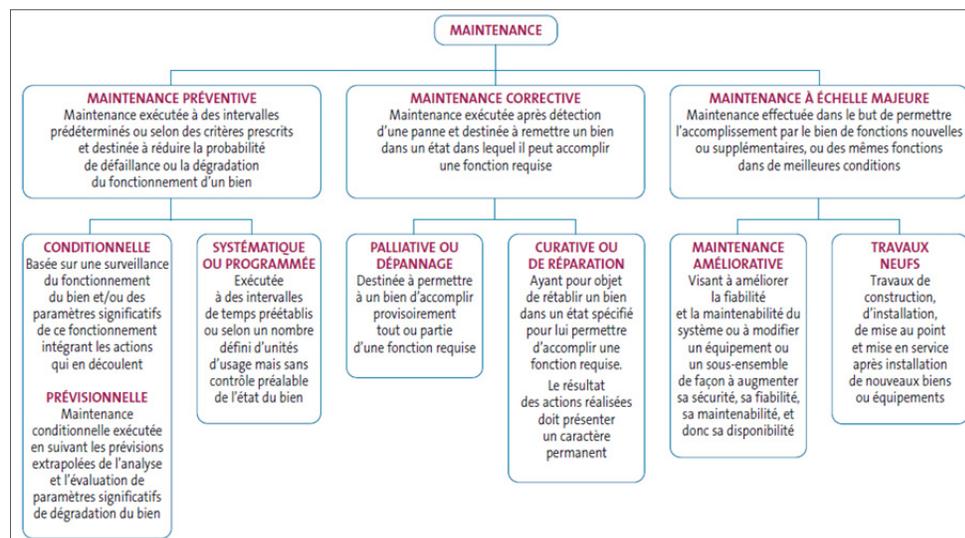


Figure 2.4 Les formes courantes de maintenance
Tirée de (Barbat et al. (2013), p.2)

2.2 Les technologies et les applications industrielles de la maintenance prédictive

En tant qu'une forme de maintenance préventive conditionnelle, le but de la maintenance prédictive est de détecter les signes précurseurs d'une défaillance et de prendre les actions correctives qui s'imposent avant leur survenue. Elle utilise des méthodes non destructives et des technologies permettant de surveiller l'état de fonctionnement des actifs ou de leurs composantes constitutives au cours de leur cycle de vie. Les technologies utilisées en maintenance prédictive sont donc les mêmes que celles des contrôles non destructifs (CND).

Les CND sont des techniques non invasives permettant de déterminer l'intégrité du matériel dans le but de prédire ou d'évaluer la performance et la durée de vie utile des actifs ou de leurs composants constitutifs au cours des différentes étapes de la production ou au cours des cycles de maintenance (IAEA, 2005). En d'autres termes, la maintenance prédictive est une politique ou une stratégie de maintenance utilisant les techniques de CND comme méthodes d'auscultation à application en maintenance (puisque les CND sont aussi utilisées pour les contrôles de qualité au cours de la production), pour faire des prévisions extrapolées des défaillances et de la durée de vie résiduelle des actifs.

Les différentes technologies de maintenance prédictive sont assez variées et leurs applications dépendent de la constitution technologique des actifs ainsi que des types de paramètres (physiques, chimiques, électromagnétiques etc.) à surveiller. Les récentes évolutions technologiques et scientifiques notamment le développement des systèmes d'acquisitions et de traitements informatiques ainsi que la miniaturisation des composants (capteurs et composants électronique), ont permis des conceptions des outils de maintenance prédictive plus sophistiqués. Les coûts d'acquisition, d'installation et de maintenance de ces technologies peuvent être assez dispendieux. Cependant, les nombreux avantages d'optimisation de performance des actifs qui intègre des rapports optimaux de coût-bénéfices et de coût-efficacité, sont indiscutables lorsque ces technologies de maintenance prédictives sont adéquatement appliquées sur les actifs les plus critiques. Elles sont d'ailleurs très

utilisées dans les industries lourdes telles que les centrales nucléaires, les industries agroalimentaires, les cimenteries, les industries de pétrochimie où entre autres la sécurité et la qualité sont de rigueur.

Des nombreuses technologies de maintenance prédictive qui existent, nous nous proposons ici d'aborder celles qui sont les plus utilisées. Aussi, le concept de base de la maintenance prédictive (ou même des CND) étant de prendre des décisions de maintenance lorsqu'un seuil de paramètres critiques est atteint c'est-à-dire l'aspect unidimensionnel, nous analyserons l'aspect multidimensionnel par recherche de corrélation entre un ou plusieurs signes précurseurs détectables par des technologies différentes de maintenance prédictive et par la prise en compte des données opérationnelles des actifs. L'utilité serait de coupler des technologies de maintenance prédictive pour raffiner les détections de paramètres seuils observés ainsi que les diagnostics et ainsi augmenter la fiabilité des prédictions ou des pronostics qui dépendent à la fois de la fiabilité des instruments de mesure (capteurs et système de traitement), de l'expérience ainsi que du jugement (basée sur la raison ou logique cartésienne) du personnel de maintenance.

2.2.1 Les technologies de maintenance prédictive

Elles sont diversifiées et varient suivant le domaine d'application. Nous allons aborder quelques technologies qui sont le plus utilisées. Elles sont de principes assez complexes. Une complexité accentuée par le développement technologique contemporain.

2.2.1.1 La thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique de reproduction d'images bidimensionnelle (2D) en échelle de couleurs ou de gris de radiations infrarouges émises par la distribution thermique de tout corps de température supérieure au zéro absolu (-273,15°C). Les radiations infrarouges sont des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est supérieure à la plage du spectre des ondes visibles à l'œil nu.

Le dispositif de mesure est constitué d'une caméra thermique ou caméra infrarouge munie de détecteurs spécifiques qui captent les radiations infrarouges et les transforment sous forme de signaux analogiques ou numériques. Ces signaux sont traités par un système radiométrique qui donne les valeurs thermiques du corps exploré. La thermographie a des applications diversifiées incluant le domaine de l'ingénierie industrielle, biomédicale et médicale, dans le domaine de la recherche et développement, dans le domaine du génie civil, dans le domaine maritime etc.

En maintenance prédictive, elle permet des diagnostics précis suivant le principe que la plupart des défaillances sont annoncées par une élévation de température. Malgré ces nombreux avantages, certains inconvénients sont à noter selon FLIR Systems Inc. (2013) :

- son utilisation exige un opérateur bien formé et compétent qui doit par exemple savoir régler l'indice d'émissivité de la caméra selon le type de matériaux observés;
- son coût souvent dispendieux de par sa constitution technologique qui abrite par exemple un module en germanium (matériau très coûteux).

2.2.1.2 La détection par ultrasons

Le son est une vibration mécanique. Il est audible à l'oreille humaine lorsque sa fréquence est dans la plage de 20 Hz à 20KHz. En deçà de cette plage se situent les infrasons inaudibles à l'oreille humaine et émis par exemple lors de certains phénomènes naturels (tremblement de terre, volcan, etc.) ou par certains animaux. Par opposition aux infrasons, les ultrasons sont de fréquences très élevées supérieures à 20KHz et sont donc inaudibles à l'oreille humaine.

Les ultrasons trouvent leur application dans des domaines variées. Dans le domaine médical, les ultrasons sont utilisés en échographie dans la plage de fréquences de 1Mhz à 10Mhz. Dans le milieu industriel et en maintenance prédictive, les ultrasons de fréquences comprises entre 50 kHz et 100 kHz sont souvent utilisés pour explorer les matériaux non métalliques tandis que ceux ayant une fréquence comprise entre 0.5 MHz et 10 MHz sont utilisées pour explorer les structures métalliques (IAEA, 2005).

Les ultrasons comme toute onde mécanique sont caractérisés par une vitesse ou célérité, une longueur d'onde (ou période spatiale), une fréquence et une période temporelle. Lorsqu'une onde ultrasonore est émise elle peut être réfléchiée en partie suivant les propriétés mécaniques (la densité ou l'impédance acoustique) du milieu traversé. Le délai (le temps de réponse) et l'amplitude (ou encore l'intensité) de l'écho provenant de la réflexion de l'onde de la source émettrice sont fonction de l'impédance acoustique de l'obstacle ainsi que de la distance qui sépare ce dernier de cette source.

La génération (transmission) et la réception des ultrasons se font grâce à un même transducteur (ou sonde) dont le principe est basé sur la l'effet piézoélectrique de certains cristaux tels que le quartz, propriété découverte par Pierre Curie et Marie Curie, décrivant la caractéristique de certains cristaux spéciaux pouvant produire des vibrations mécaniques (en se déformant) lorsqu'ils sont soumis à une charge électrique et réciproquement. Ainsi, les transducteurs utilisés dans les appareils d'exploration par ultrasons sont à la fois émetteurs et récepteurs des ultrasons. Un dispositif de collecte et de traitement des signaux provenant de la sonde permet de reproduire en image les données de l'écho en *mode Amplitude* ou *mode A* ou mode unidimensionnel. Un traitement numérique plus approfondi des données en *mode A* permet de convertir le *mode amplitude* en échelle de gris ou de couleurs et d'obtenir une image bidimensionnelle (2D) appelée *mode Brillance* ou *mode B*, de la structure explorée.

La figure 2.5 ci-dessous illustre le principe des applications d'ultrasons.

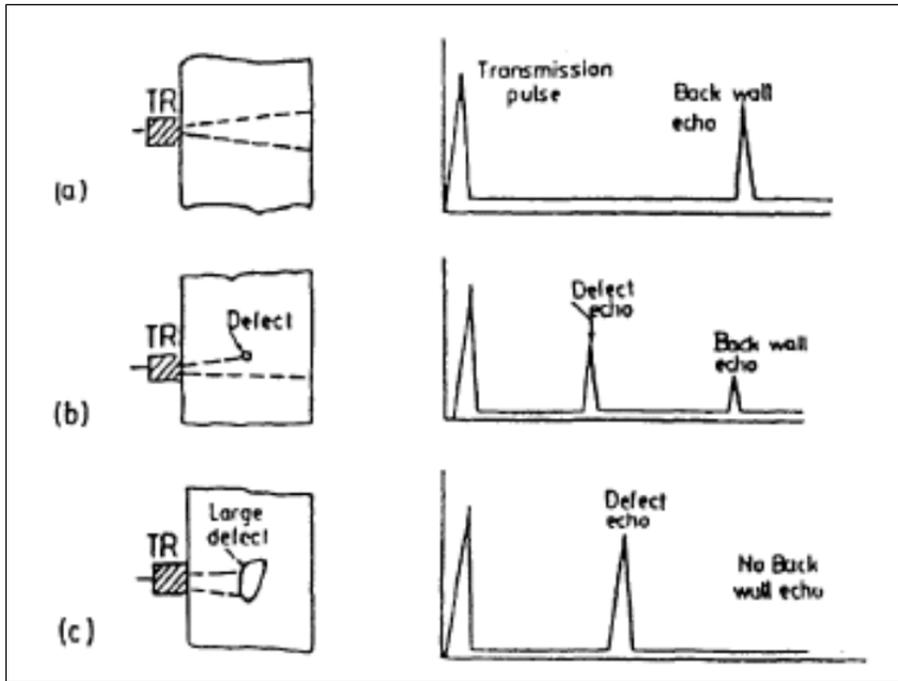


Figure 2.5 Principe des applications d'ultrasons
Tirée de (IAEA (2005), p.17)

La figure (a) montre un écho produit par un obstacle après propagation dans un milieu homogène de l'onde ultrasonore, la figure (b) montre deux échos, un premier produit par un léger obstacle ou une légère propagation acoustique (impédance acoustique) qui réfléchit une partie du signal ultrasonore d'origine, et un deuxième écho obtenu par la réflexion sur un deuxième obstacle de l'onde résiduelle obtenue après le premier obstacle. Tandis que sur la figure la figure (c) l'onde émise par la source est presque entièrement réfléchié par le premier obstacle.

Si nous désignons par **D1** la distance de la source au premier obstacle, **C1** la vitesse de propagation dans le premier milieu et **T1** le temps de réponse du premier écho à l'impulsion de l'onde de la source, alors nous pouvons écrire:

$$T1=2 L1/C1 \quad (2.1)$$

Suivant ce principe, en maintenance prédictive l'exploration des matériaux ou des composants mécaniques par des ondes ultrasonores peut permettre de détecter et de localiser

avec précision toute variation anormale d'impédance acoustique dans leur structure, indicatrice de signes précurseurs à la survenue d'une défaillance.

Il est important de noter que la bonne détection de défauts mécaniques de la structure explorée dépend du bon choix de la fréquence ultrasonique sélectionnée. Plus la structure à observer est en surface et plus grande sera la fréquence des ultrasons à utiliser et plus elle est en profondeur plus petite sera la fréquence des ultrasons.

La technologie d'exploration par ultrasons présente des avantages incontestables en maintenance prédictive. Cependant elle présente certaines limitations telles que la bonne interprétation des graphes ou des images d'écho obtenus qui exige l'avis d'experts ou de personnes hautement qualifiées, et l'acquisition d'une telle technologie est assez dispendieuse. Aussi, l'écho nécessaire au diagnostic interne de la structure n'est effectif que si les ultrasons émis par le transducteur ne sont pas parallèles aux défauts mécaniques à détecter sinon aucune réflexion ne se produirait et aucun écho ne serait détecté..

2.2.1.3 L'analyse des huiles

Lorsque deux corps sont en contact et qu'au moins l'un d'entre eux est en mouvement, il est nécessaire de les lubrifier afin de réduire l'énergie thermique due aux frottements. Lorsque les corps en contact sont métalliques la lubrification a aussi le rôle d'éviter leur corrosion.

Ainsi, une analyse des lubrifiants peut témoigner de la qualité de la lubrification et renseigner sur l'état des composants lubrifiés. C'est le principe de base de l'analyse des huiles.

Selon G. P. Sullivan. et al. (2010), trois caractéristiques d'états de base des machines peut être diagnostiquées par l'analyse des huiles :

- la détermination des propriétés de l'huile telles que la viscosité, l'acidité etc. qui peuvent renseigner sur l'état de l'huile;
- la détermination du degré de contamination de l'huile par la présence anormale de corps étrangers tels que l'eau, le silicone, et autres contaminants;

- la détermination de la présence et la quantité de particules métalliques telles que le fer, le plomb, le nickel, le chrome, l'aluminium etc. (G. P. Sullivan. et al., 2010).

L'analyse des huiles est assez connue du monde industriel car plusieurs actifs sont composés de parties tournantes nécessitent une lubrification.

Même si l'analyse des propriétés physiques et chimiques des lubrifiants doit être réalisée par un personnel hautement qualifié ou par des laboratoires experts, l'analyse des huiles est une technologie de maintenance prédictive utilisant du matériel moins dispendieux comparativement aux autres types technologies. En dehors des prélèvements d'échantillons d'huiles pour analyse au laboratoire, il existe aussi des capteurs montés directement en contact avec les lubrifiants sur les machines qui mesurent en permanence certaines propriétés des huiles et restituent par un dispositif de traitement des valeurs indicatives sur l'analyse des lubrifiants. L'interprétation de ces données par un personnel qualifié est nécessaire pour une prise de décision éclairée.

2.2.1.4 L'analyse vibratoire

L'une des technologies largement utilisée en maintenance prédictive est l'analyse vibratoire. Son principe repose sur le fait que tout système mécanique en rotation ou oscillant autour d'un axe, décrit son oscillation ou un mouvement vibratoire de fréquence et d'amplitude propres en mode de fonctionnement sans défaillance. Cette fréquence et cette amplitude peuvent évoluer et changer leurs valeurs nominales durant le cycle de vie de la composante mécanique considérée à cause de l'effet de l'usure. Ainsi, lorsqu'il y a variation de la fréquence et l'amplitude de vibration par rapport aux valeurs nominales, cela traduit des signes précurseurs de défaillances dans le système mécanique considéré. Les caractéristiques essentielles d'une vibration mécanique sont la fréquence et l'amplitude.

L'amplitude étant la variation maximale ou valeur crête du déplacement du mouvement oscillatoire, elle peut être décrite par le déplacement, ou encore par la dérivée du déplacement (la variation du déplacement) qui est la vitesse ou encore par la double dérivée du déplacement qui est l'accélération (dérivée de la vitesse ou la variation de la vitesse).

C'est pourquoi les grandeurs caractéristiques mesurées lors de l'analyse vibratoire des machines ou de leurs composants sont :

- La fréquence de vibration qui traduit le nombre de cycles par unités de temps;
- Le déplacement qui est la distance crête-à-crête;
- La vitesse ou la vélocité;
- L'accélération qui est la variation de la vitesse. (IAEA, 2005).

La mesure de toutes ces grandeurs physiques permet de détecter sur les machines tournantes des défauts de désbalancement ou de déséquilibre mécanique, de désalignement, de défauts de roulements, de déséquilibre de phase électrique sur le stator du moteur, etc.

Du fait que, les valeurs nominales de la fréquence et de l'amplitude de la vibration des machines tournantes vont évoluer selon leur usure ou leur dégradation, il est important d'intégrer dans l'analyse vibratoire l'historique de l'actif de sa composante rotative afin de mieux apprécier la déviation par rapport à la valeur de référence à un instant approprié de son cycle de vie.

L'analyse vibratoire utilise différents capteurs montés directement sur les parties mécaniques spécifiques de l'actif pour la collecte de données de vibration. L'analyse de ces données est complexe et exige un personnel hautement qualifié et expérimenté. De même, les coûts d'une telle technologie sont assez élevés.

2.2.1.5 Autres technologies de maintenance prédictive

Les technologies explorées ci-haut sont loin d'être les seules utilisées en maintenance prédictive. Plusieurs autres technologies sont utilisées en maintenance prédictive au nombre desquels :

- les technologies LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) qui utilisent les rayons LASER (des rayons cohérents du point de vue temporel et spatial) pour diagnostiquer les problèmes d'alignement mécanique,
- la radiographie ou la radioscopie qui utilise les générateurs de rayons-X ou de rayons gamma pour explorer les pièces solides par comparaison de variation anormale de contrastes entre deux structures de densités connues, en vue de détecter par exemple des fissures, des déformations, ou d'autres anomalies mécaniques. Une représentation partielle ou complète de la structure observée est possible sous forme de clichés (en graphie) ou d'image visuelle (en scopie).
- etc.

2.2.2 Corrélation entre deux ou plusieurs technologies de maintenance prédictive : aspect multidimensionnel

En matière d'analyse des technologies de la maintenance prédictive, la quantité et la qualité des données collectées sont déterminantes pour un diagnostic de qualité. En général, les prises de décisions d'exécution de tâches de maintenance prédictive se font dès qu'un seuil est atteint pour la grandeur physique sous surveillance. Or les différentes grandeurs physiques mesurées sur les actifs par application des technologies de maintenance prédictive peuvent être corrélées entre elles. Une collecte de mesurées de grandeurs physiques corrélées peut donc permettre de faire des analyses et des interprétations de qualité et raffiner les décisions d'exécution des tâches de maintenance prédictive: c'est l'aspect multidimensionnel de l'application des technologies de maintenance prédictive. L'aspect multidimensionnel de l'application des technologies de maintenance prédictive permet de déterminer avec exactitude le degré de sévérité du défaut et conduire avec certitude au composant défaillant.

Il rend les décisions de maintenance efficaces et efficientes et donc augmente la performance de la politique de maintenance prédictive. Nous pouvons avoir une corrélation entre les technologies suivantes :

- *Analyse vibratoire,*
- *Analyse d'huile,*

- *LASER*,
- *Thermographie Infrarouge*.

En effet, il est possible qu'une analyse vibratoire qui révèle par exemple un défaut de roulements dans un palier soit confirmée par une thermographie infrarouge (à cause de la dissipation éventuelle de chaleur dans le palier), ou encore par l'analyse des huiles des lubrifiants du palier (à cause du changement éventuel des propriétés physiques ou chimiques telles que la viscosité) ou encore par le désalignement détectable par rayons LASER. Même une analyse par ultrasons peut bien s'aligner avec les autres technologies pour la détection des défauts de roulements dans ce palier.

Le tableau 2.1 tiré du rapport réalisé par Sullivan et al. (2010) montre les différentes applications possibles de quelques technologies de maintenance prédictive. En outre, il indique la possibilité de corrélation entre deux ou plusieurs technologies. Sur les Pompes par exemple ou encore sur les moteurs électriques plusieurs technologies peuvent être appliquées. Il est donc bien possible que les données de mesure de grandeurs physiques collectées sur ces composants soient corrélées et aider à un meilleur diagnostic.

Technologies	Applications	Pumps	Electric Motors	Diesed Generators	Condensers	Heavy Equipment/ Cranes	Circuit Breakers	Valves	Heat Exchangers	Electrical Systems	Transformers	Tanks, Piping
Vibration Monitoring/Analysis		X	X	X		X						
Lubricant, Fuel Analysis		X	X	X		X					X	
Wear Particle Analysis		X	X	X		X						
Bearing, Temperature/Analysis		X	X	X		X						
Performance Monitoring		X	X	X	X				X		X	
Ultrasonic Noise Detection		X	X	X	X			X	X		X	
Ultrasonic Flow		X			X			X	X			
Infrared Thermography		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Non-destructive Testing (Thickness)					X				X			X
Visual Inspection		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Insulation Resistance			X	X			X			X	X	
Motor Current Signature Analysis			X									
Motor Circuit Analysis			X				X			X		
Polarization Index			X	X						X		
Electrical Monitoring										X	X	

Tableau 2.1 Exemples de quelques technologies de maintenance prédictive et leurs applications

Tiré de G.P. Sullivan et al. (2010, p.6.1)

2.3 Cas particulier de la maintenance prédictive biomédicale et hospitalière

La maintenance biomédicale et hospitalière à l'instar de la maintenance industrielle utilise les technologies de maintenance prédictive.

En maintenance biomédicale et hospitalières, les actifs peuvent être classés en deux grandes catégories :

- Les actifs de type biomédical tels que les équipements médicaux utilisés pour les diagnostics médicaux, la thérapie, la stérilisation etc. et regroupant: l'imagerie médicale, les laboratoires d'analyses biomédicales, la neurologie, l'anesthésie et réanimation, les blocs opératoires, obstétriques et gynécologie, la physiothérapie, la centrale de stérilisation etc.;
- Les actifs de type industriel ayant un rapport direct avec la mécanique, l'électricité, l'informatique, et qui regroupent le génie mécanique et de la construction (bâtiments, systèmes de climatisation, systèmes de ventilation, systèmes d'éclairage, les systèmes de chauffage, véhicules roulants, etc.), le génie informatique (matériel et logiciel), le génie électrique (les centrales électriques de l'hôpital, les groupes électrogènes, etc.)

Pour les actifs de type industriel, les technologies de maintenance prédictive sont appliquées de la même manière que toutes les descriptions qui précèdent selon chaque cas d'applications. Ainsi par exemple l'état des tuyauteries à vapeur, ou encore la structure des bâtiments peuvent être contrôlés ou surveillés par la thermographie infrarouge ou par les ultrasons. Les transformateurs haute-tension peuvent être contrôlés par la thermographie infrarouge ou par l'analyse des huiles. De même, l'analyse vibratoire ou l'analyse des huiles peuvent être utiles pour la maintenance prédictive des compresseurs d'air.

En revanche, pour les actifs de type biomédical c'est-à-dire les équipements biomédicaux comme cités ci-haut, la maintenance prédictive revêt une forme plus particulière. Certes, elle

ne déroge pas au principe connu de la maintenance prédictive qui est de collecter et d'analyser les données d'état de l'actif pour en déduire un pronostic de défaillance prochaine ou de durée de vie résiduelle. Mais, le fait que certains équipements médicaux disposent de par leur conception certains modules pouvant renseigner sur leur état de fonctionnement afin de programmer une tâche de maintenance juste à temps, une maintenance prédictive est possible. La qualité des soins de santé prodiguée aux patients doit être infaillible, telle doit être la philosophie de tous les acteurs de la santé. Les normes et les réglementations en matière de qualité sont peu clémentes lorsque les patients admis aux soins devront être victimes de soins de mauvaise qualité. La qualité des soins étant basée sur un meilleur diagnostic, il devient crucial que les équipements médicaux de diagnostic soient très fiables tout au long de leur durée de vie.

C'est pourquoi, il est important qu'un bon choix de politique de maintenance soit fait pour la maintenance des équipements médicaux afin de s'assurer des caractéristiques fondamentales des équipements médicaux basées sur une fiabilité intrinsèque et une fiabilité opérationnelle qui s'appuient sur: la reproductibilité, la précision, l'exactitude et la fidélité. Dans ce contexte, la maintenance prédictive permet de régler de nombreux défis. En industrie, la défaillance des machines peut occasionner des pertes de la production et d'autres problèmes d'ordre économiques ou encore des problèmes de sécurité. De même, dans le domaine biomédical, une défaillance d'un équipement médical peut entraîner des dommages sur des vies humaines et parfois la mort. C'est pourquoi le service maintenance biomédical doit suivre rigoureusement l'état de fonctionnement des équipements en adoptant la politique optimale de maintenance, en faisant des inspections régulières, des contrôles de performance, la calibration ou l'étalonnage du parc matériel médical, afin de leur garantir une fiabilité opérationnelle très élevée.

Le géant américain du matériel médical *General Medical System inc.* a fait cession en 2005 du brevet de maintenance prédictive sur les équipements médicaux inventé par Breunissen, Hardiman et Shubha (2005). Dans ce brevet, la procédure de maintenance prédictive sur les équipements d'imagerie médicale a été décrite. En effet, dans la conception des équipements

médicaux en général et les équipements d'imagerie médicale en particulier, plusieurs fonctionnalités de l'équipement sont auto diagnostiquées et des alarmes peuvent retentir pour indiquer des défauts, même partiels. En outre, en dehors des appels de service pour intervenir sur ces équipements, des inspections périodiques ainsi que les tâches de maintenance préventive systématiques sont le plus souvent utilisés. L'originalité de cette invention est l'intégration dans la conception des systèmes d'imagerie médicale des modules pouvant permettre d'exploiter les données opérationnelles des équipements pour mieux programmer des tâches de maintenance préventive. Le traitement des données opérationnelles recueillies permettent de définir des modèles de référence et servant à évaluer l'adéquation de l'adoption d'une politique de maintenance préventive systématique ou d'une politique de maintenance prédictive se basant sur l'état de fonctionnement de l'équipement (Breunissen, Hardiman et Shubha, 2005).

La figure 2.6 tirée de ce brevet, illustre un exemple de cette invention applicable à une unité de scannographie à rayon-x (CT scanner) :

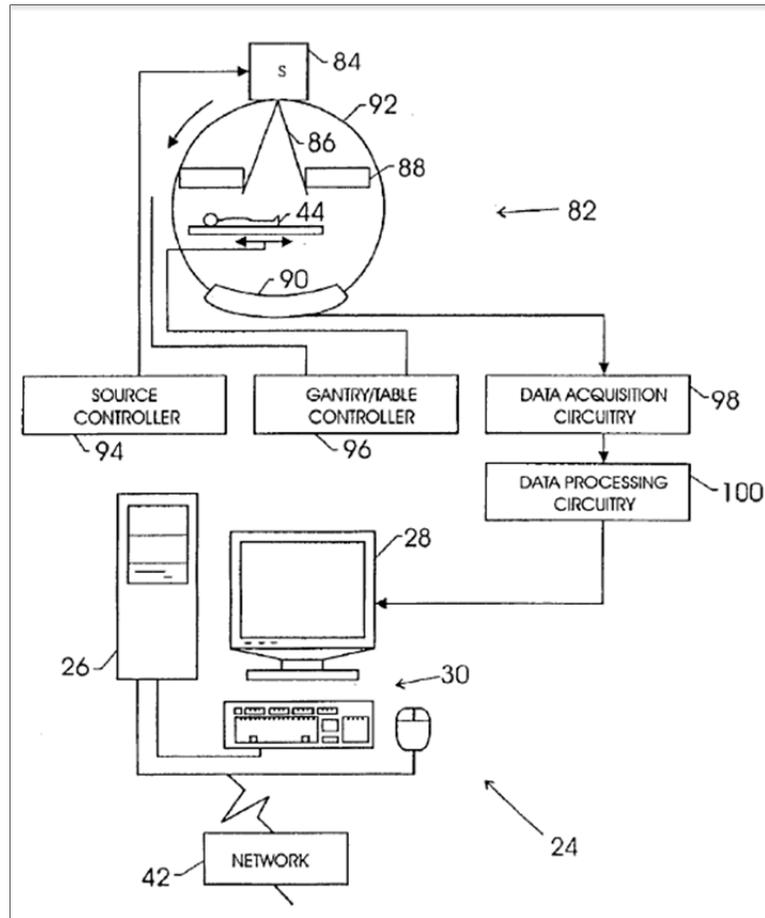


Figure 2.6 Synoptique de la maintenance prédictive sur un scanner RX

Tirée de (Breunissen, Hardiman et Shubha (2005), p.1)

Légendes

(24) la console, (26) l'unité centrale, (28) écran d'affichage, (30) clavier, (42) connexion au réseau informatique, (44) lit patient motorisé, (82) ensemble de la chaîne radiologique du scanner, (84) tube radiogène, (86) faisceau de rayon-x, (88) collimateur, (90) détecteur, (92) portique ou statif, (94) contrôleur du tube à rayon-x, (96) contrôleur de l'ensemble portique/lit, (98) système d'acquisition de données, (100) système de traitement des données

Les composantes essentielles d'une unité de tomodynamométrie ou de scanner à rayon-x (ou encore scannographie à rayon-x ou encore tomographie informatisée) sont décrites sur la figure. De façon concise,, le principe de fonctionnement en est le suivant : un tube radiogène

(source des rayon-x) émet des rayon-x à travers un collimateur. Les rayon-x traversent le corps du patient introduit par mouvement transversal dans le champ d'irradiation par un lit motorisé. Les radiations sont atténuées en traversant le patient et sont captées par un détecteur et un module d'acquisition qui les convertit en signaux analogiques puis en signal numérique (données brutes). Le signal numérique est ensuite transféré à une console informatique qui procède en une reconstruction matricielle (créant des données images) et affiche sur un écran l'image de la partie scannée. La matrice de reconstruction est faite de pixels dont l'intensité est proportionnelle à la densité de la partie du corps scannée. Depuis l'invention de la tomodensitométrie en 1979, plusieurs générations se sont succédées au fil des ans avec des technologies de complexité évolutive.

Les données opérationnelles à utiliser dans la procédure de maintenance prédictive et transmises à travers un réseau informatique relié à la console du scanner, sont celles non seulement des images acquises mais aussi celles provenant de la source radiogène (dont la dose de rayon-x ainsi que le nombre d'exposition peuvent être bien quantifiés, ou encore celles du statif du scanner (portique et lit).

Un modèle sera ensuite défini avec ces données et permettront de mieux planifier les tâches de maintenance préventive. En outre, dans cette invention, il est possible de traiter les données opérationnelles provenant de plusieurs types de scanners de même modèle afin de raffiner les données de modèle de référence et de modifier en conséquence la planification des tâches de maintenance préventive.

De façon analogue, une démarche similaire peut s'appliquer aux autres types d'équipements d'imagerie médicale (IRM, échographes, unité de radiologie, etc.) et même d'autres équipements médicaux tels que les automates de laboratoire d'analyses biomédicales.

Par ailleurs, avec la possibilité de rendre disponibles à travers un réseau informatique des données opérationnelles des équipements médicaux, la collecte de données multi sites et leur centralisation, la nécessité de collaboration entre plusieurs acteurs de maintenance et la télémaintenance ou le support technique à distance, une adoption de maintenance prédictive

informatique offrirait d'énormes avantages. Même si les informations opérationnelles en milieu médical doivent jouir d'une extrême confidentialité, l'information à caractère privé peut être adoptée.

2.4 La GMAO : récapitulation des fonctionnalités et état de l'existant

Pour atteindre ses objectifs, toute organisation doit utiliser les moyens et outils nécessaires permettant une gestion optimale de ses actifs.

Avec la pléthore d'informations à gérer dans les entreprises et la concurrence généralisée, les politiques de gestion des entreprises ont évolué avec l'intégration de nouveaux moyens permettant de faciliter et d'optimiser la gestion. Dans la configuration suggérée par le PAS 55 comme explicité dans le premier chapitre, la fonction maintenance est l'une des fonctions principales qui définit la performance des actifs de l'entreprise. Dans le système de gestion de l'entreprise, elle est intimement liée aux autres fonctions de l'entreprise et mieux la gérer permet d'optimiser la performance de l'entreprise. Dans un tel contexte, la gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) ne peut être qu'une solution très utile.

2.4.1 Description et importance de la GMAO

L'avènement des technologies de l'information et des communications (TIC) il y a des décennies a apporté des changements profonds dans la gestion des actifs. Les logiciels ou progiciels de GMAO (gestion de la maintenance assistée par ordinateur) représentent un outil de gestion né de l'introduction des TIC en industrie face au volume important d'informations à gérer par la fonction maintenance. Elle entend optimiser la gestion complète de la fonction la maintenance au sein de l'organisation.

Les attentes de l'informatisation de la gestion de la maintenance sont :

- éviter une redondance des informations source de perte de temps et d'incohérence et mieux les intégrer aux flux;

- éviter de saisir deux ou plusieurs fois les mêmes informations permettant une bonne cohérence de l'information;
- permettre une modification de l'information par une seule personne limitant de ce fait les erreurs de saisie;
- permettre un accès autorisé et sécurisé aux informations ((Frédéric, 2011), p.166).

Par ailleurs, l'introduction des technologies de l'information et de la communication n'ayant pas affecté seulement la fonction maintenance de l'entreprise, il devient important que la GMAO puisse s'interfacer avec d'autres logiciels de gestion des finances, de la production, de la logistique, des SAV, etc. Certains logiciels ont été conçus pour permettre la gestion intégrée et globalisée de toutes les ressources de l'entreprise. Ce sont les progiciels de gestion intégré (PGI) en anglais enterprise resource planning (ERP).

La tendance sur le marché des progiciels de GMAO est de type «*full web*» ergonomique (avec un serveur d'application et un serveur de bases de données) intégrant l'utilisation d'interfaces intelligents tels que les tablettes (ergonomie d'utilisation) ainsi que les technologies RFID (Radio frequency identification) qui eux permettent par exemple de mieux retracer les équipements et de mieux gérer les stocks de pièces de rechange (Vasse, 2014).

La GMAO est la gestion informatisée de la maintenance. En tant que telle, elle doit permettre de gérer toutes les fonctionnalités de maintenance. Les GMAO sont utiles et trouvent leur application dans la gestion de la maintenance des actifs industriels tels que les bâtiments, le génie civil, les mines et pour la gestion des actifs dans les structures biomédicales et hospitalières. Leur acquisition et leur implémentation ainsi que leur maintenance doivent s'inscrire dans une démarche digne de tout autre projet. Un audit de la fonction maintenance est nécessaire dans les phases d'un tel projet car aucun projet de GMAO ne peut être effectif dans une entreprise où la fonction maintenance n'existe pas ou n'est pas rigoureusement organisée.

2.4.2 Récapitulation des fonctionnalités des GMAO

Le socle de tout progiciel de GMAO est sur un inventaire fiable du parc matériel à maintenir. L'inventaire doit permettre d'avoir une idée exacte et exhaustive de l'ensemble du parc car il permet de définir les autres modules fonctionnels ou fonctionnalités des progiciels de GMAO. Une récapitulation de ces modules fonctionnels est comme décrite dans le tableau ci-dessous. Tous ces modules fonctionnels ne sont pas forcément indispensables pour toute entreprise et il est important qu'une évaluation de besoins soit effectuée avant l'acquisition d'un progiciel de GMAO dans un contexte coût-avantages et de retour sur investissement.

En nous inspirant de (Frédéric (2011), p.176), Ismaïl Benissaad, 2007-2008, p. 9, 92 à 107) nous avons résumé ci-dessous les fonctionnalités des progiciels de GMAO comme suit :

- *Management de la maintenance* : définir et gérer la politique, la stratégie et les objectifs de l'entreprise;
- *Gestion du parc d'actifs* : identification de chaque actif, accès aux fiches machines et spécifications techniques, accès aux historiques complets, maintenir la connaissance des équipements etc.;
- *Gestion des tâches de maintenance* : bons de travaux (BT), ordres de travaux (OT), rapports d'interventions;
- *Gestion des indicateurs de performance et de ratios et du suivi opérationnel* : KPI fondés par exemple sur la qualité, la sécurité, les coûts, les temps, tableau de bord etc.;
- *Gestion des travaux de maintenance* : maintenance préventive, curative, les inspections etc.;
- *Gestion des grands travaux de maintenance* : les grands arrêts, les travaux neufs, les investissements;

- *Gestion de la planification* : plan et ordonnancement de maintenance, établissement d'échéancier d'exécution des tâches de maintenance;
- *Gestion des ressources humaines* : Gestion des compétences, recrutement, déploiement pour les travaux, promotion, calendrier de travail, suivi des stages et formations, etc.;
- *Gestion des stocks en maintenance*: pièces de rechange, magasins de stockage, pièces disposés, etc.;
- *Gestion achats et des approvisionnements* : contrats, devis, approvisionnements;
- *Analyse des défaillances* : analyse des défaillances par AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et leur Criticité, analyse par Pareto, HAZOP (Hazard and Operability studies) ou analyse des risques;
- *Gestion du budget de maintenance* : optimisation des coûts, gestion du budget, le retour sur investissement, etc.;
- *Fonctionnalités complémentaires ou interfaçages utiles* : logiciel de paie et de comptabilité, logiciel de la gestion de la production, lecture des badges, logiciel de gestion des ressources humaines de l'entreprise, etc.

Ces fonctionnalités ont été regroupées dans le tableau-A I-1 de l'annexe I.

2.4.3 Apports de la maintenance prédictive infonuagique aux progiciels de GMAO

Les GMAO sont incontournables pour une meilleure gestion de la maintenance des actifs de l'entreprise. Elles doivent permettre de réduire les coûts, les temps et les ressources investies et améliorer la qualité et la sécurité. Les offres sont diversifiées sur le marché selon les domaines d'activités des entreprises. Une liste des principaux vendeurs de progiciels de GMAO est décrite dans le tableau-A I-2 de l'annexe I. Malgré le génie créateur dont

jouissent les GMAO, elles présentent certaines insuffisances dues aux coûts énormes d'acquisition, d'implémentation et de leur maintenance. Les GMAO de par leur conception sont de très bons outils pour planifier et ordonnancer les tâches de maintenance ainsi que pour retracer les historiques en temps différé des actifs, mais ne peuvent pas surveiller en temps réel l'état de fonctionnement des actifs dédié à la maintenance prédictive. Mais avec les nombreuses technologies déployées pour la maintenance prédictive, cette dernière exige une infrastructure et une gestion de flux particulière. Cela entraîne une certaine incohérence entre les GMAO et les technologies de maintenance prédictive qui sont tous deux gestionnaires de sources de pléthore d'informations disparates dans l'entreprise. Et pourtant GMAO et maintenance prédictive ont des objectifs convergents, ceux d'optimiser les coûts, les ressources, les temps et la sécurité. En effet, les GMAO fonctionnent avec les temps de maintenance qui sont calendaires tandis que la maintenance prédictive opère en temps réel en surveillant l'état des actifs. C'est l'expression d'une incohérence temporelle entre GMAO et maintenance prédictive. En d'autres termes l'introduction des technologies très complexes et dispendieuses de maintenance prédictive dans la gestion de maintenance de l'entreprise rend rigides les fonctionnalités des GMAO. D'autres facteurs de rigidité des GMAO une fois installées, s'expriment par :

- les contraintes budgétaires,
- les normes et réglementations,
- la complexité grandissante de la technologie des actifs,
- l'interfaçage avec de nouveaux progiciels tels que la gestion de la production assistée par ordinateur (GPAO),
- la gestion des ressources humaines,
- la gestion des tâches de maintenance (ordonnancement et planification),
- l'analyse des défaillances, etc.

Par ailleurs, nous avons vu dans le premier chapitre comment la maintenance prédictive améliore la gestion des actifs physiques mais présente des insuffisances résolues par l'infonuage. Aussi, l'incohérence temporelle entre GMAO et maintenance prédictive est aussi résolue par l'infonuage.

Concrètement, en hébergeant la maintenance prédictive traditionnelle dans l'info nuage, les entreprises réduiront leur investissement autrefois nécessaire pour les infrastructures informatiques dispendieuses. De plus l'impact de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques permet d'enrichir les fonctionnalités de leur GMAO sur les différents aspects suivants :

- La gestion des tâches de maintenance: la création des bons de travail (BT), les ordres de travail (OT), la planification des tâches etc., initiée par l'analyse des données de surveillance des actifs, sont disponibles dans l'info nuage et permet d'alimenter les GMAO par une interopérabilité;
- La gestion des ressources humaines, gestion des pièces de rechange(gestion des stocks), gestion des achats et approvisionnement : avoir les pronostics de défaillance dans les GMAO par info nuage permet à la fonction ordonnancement et réalisation de mieux planifier les ressources humaines et les pièces de rechange juste nécessaires à la réalisation des tâches, de prévoir les achats ou des approvisionnements juste à temps;
- La possibilité d'analyse de défaillance par les données dynamiques de la maintenance prédictive ainsi que l'historique des défaillances disponibles dans l'info nuage pour alimenter les GMAO enrichit ces dernières pour leur fonction d'analyse de défaillances;
- Gestion des ICP (indicateurs clés de performance): la disponibilité, le temps, les coûts, la qualité, les ressources etc. sont des exemples de fonctions génératrices d'ICP. Ces fonctions sont des fondements de la maintenance prédictive infonuagique et le suivi et la gestion des ICP qui y sont dérivés par les GMAO sont facilités par les données de performance de la maintenance prédictive disponibles dans l'info nuage;
- les interfaçages entre les GMAO et d'autres logiciels de gestion (finances, production, SAV, etc.) sont rendus possibles par l'interopérabilité entre GMAO et maintenance prédictive infonuagique.

En somme, la maintenance prédictive infonuagique s'intègre mieux aux GMAO et les enrichit en optimisant leur performance et leurs rapports coûts-avantages et coût-efficience. Ce nouveau concept de maintenance prédictive infonuagique pour améliorer les GMAO traduit des opportunités technico-économiques pour tout outil ou logiciel de gestion pouvant rendre possible cet enrichissement des fonctionnalités GMAO et ainsi donc l'optimisation de la gestion des actifs physiques.

Notons enfin que l'enrichissement des GMAO ou de la gestion des actifs par la maintenance prédictive infonuagique quand bien même incontestable reste à peine perceptible par le monde industriel. En conséquence, cette nouvelle opportunité technico-économique est peu adoptée par diverses entreprises. Il est donc indispensable de concevoir un référentiel multicritère technico-économique pouvant amener les acteurs du monde industriel à prendre conscience des intérêts dans l'adopter une telle politique. En d'autres termes, un référentiel multicritère technico-économique doit permettre de démontrer l'optimisation des rapports coût-avantage et coût-efficacité et l'enrichissement des GMAO par la maintenance prédictive infonuagique contre les autres formes de maintenance (réactive et systématique).

2.5 Nécessité de mesurer la performance de la fonction maintenance au sein de l'entreprise

Le but ultime recherché par chaque entreprise est la réalisation de profits, gage de sa survie. Ces profits reposent entre autres sur la performance des actifs physiques. Or la performance des actifs physiques est dictée par la performance de la gestion de la fonction maintenance. Ainsi, après un choix d'une bonne politique et stratégie de maintenance pour les actifs, il est important de mesurer et de surveiller des facteurs clés de performance afin de les optimiser et de s'assurer que les objectifs sont bien atteints et pérennisés. Ce canevas de facteurs définis dans le tableau de bord de maintenance permettant de suivre la performance de la maintenance est synonyme d'indicateurs clés de performance (ICP), en anglais key performances indicators (KPI).

Les ICP sont non seulement importants pour prendre des décisions éclairées et mieux gérer la maintenance (aspect interne au service maintenance) au sein de l'entreprise, mais aussi ils permettent de convaincre la haute direction et les parties prenantes (aspect externe) que la performance de la fonction maintenance est bien alignée sur la politique, la stratégie et les objectifs globaux de l'entreprise.

La Norme AFNOR FD X 60-000 a établi les principales fonctions des indicateurs clés de performance devant figurer dans le tableau de bord de gestion de la maintenance qui sont: de mesurer l'efficacité technique et économique de la maintenance, de diagnostiquer d'éventuels dysfonctionnements, d'aider à la prise de décisions et enfin de faciliter la communication avec les personnels de maintenance, de la production et de la direction (AFNOR, 2002).

Cependant, notons que même s'il n'existe pas de standards d'indicateurs clés de performance communs à toute sorte d'entreprise, il est important, comme le recommande la norme AFNOR X60-020, que les indicateurs de performance de la fonction maintenance soient des ratios devant la caractériser suivant trois niveaux: - l'importance des coûts par rapport aux performances générales de l'entreprise, - la politique choisie en matière de maintenance et de gestion des biens - et la gestion du personnel de la maintenance (Elfezazi et al., 2003). Pour choisir des indicateurs de performance, il est nécessaire de partir de certains facteurs caractéristiques de la performance. Par exemple il peut s'agir de la qualité, les ressources, le temps ou encore le coût. Elfezazi et al. (2003) ont proposé dans leur étude des indicateurs de performance de la fonction maintenance certains indicateurs clés de performance. En se basant sur une fonction de base définie par les temps (temps d'intervention en maintenance, temps d'attente). Les coûts (main d'œuvre, pièces de rechange, maintenance préventive, maintenance curative, etc.), la qualité (sécurité, capacité, fiabilité). Ainsi, plusieurs indicateurs de performance ont été développés sous forme de ratios dont quelques exemples sont les suivants :

$$\text{Ratio du temps maintenance préventive} = \frac{\text{Heures de maintenance préventive}}{\text{Heures totales de maintenance}} \quad (2.2)$$

$$\text{Ratio du temps maintenance corrective} = \frac{\text{Heures de maintenance corrective}}{\text{Heures totales de maintenance}} \quad (2.3)$$

$$\text{Taux de qualité} = \frac{\text{Volume de non conformités}}{\text{Volume totale de production}} \quad (2.4)$$

$$\text{Ratio de rapidité d'intervention} = \frac{\text{Total heures de réparation}}{\text{Total heures d'arrêt}} \quad (2.5)$$

$$\text{Taux de travaux par personne} = \frac{\text{Nombre de DT traitées par le service}}{\text{effectif du service}} \quad (2.6)$$

(DT = demande de travaux).

$$\text{Taux de ralentissement} = \frac{\text{Capacité actuelle}}{\text{Capacité nominale}} \quad (2.7)$$

La liste est longue et les indicateurs clés de performance devront être définis en fonction plusieurs facteurs tels que: la politique, la stratégie et les objectifs de l'entreprise, le type d'entreprise, le parc d'actifs à maintenir, la politique, la stratégie et les objectifs de la fonction maintenance etc.

Après avoir examiné les ICP et les enjeux et opportunités technico-économiques de l'enrichissement des GMAO par la maintenance prédictive infonuagique, il est opportun de décrire une solution innovante s'inscrivant dans cette optique.

2.6 Description de la solution //m⁴ de Matricis Informatique

La solution //m⁴ est une solution novatrice de la société Matricis Informatique dont le siège est situé à Montréal au Québec au Canada. //m⁴ se décrit comme une solution offerte en tant que service dans l'infonuagique, c'est-à-dire, payable à l'utilisation. C'est une solution applicative conçu pour rentabiliser la gestion des actifs physiques par le biais de la maintenance conditionnelle/prédictive. Rappelons que le principe directeur de la maintenance

conditionnelle est la surveillance d'état des actifs et la création d'actions de maintenance suivant la criticité des paramètres surveillés.

Nous avons expliqué un peu plus haut les avantages de la maintenance conditionnelle/prédictive sur la gestion des actifs physiques. Nous avons également vu comment la maintenance prédictive infonuagique permet de résoudre les insuffisances de la maintenance prédictive traditionnelle et une optimisation de la performance de la fonction maintenance.

La solution //m⁴ s'inscrit dans cette logique. Les séquences d'exécution de la solution //m⁴ sont décrites de façon succincte suivant le processus global de la figure 2.7 dont les différentes étapes sont comme suit :

- Des données de surveillance d'état des actifs sont collectées en temps réel par la technologie «PI system» de la firme *OSIsoft* (*OSIsoft* est un leader mondial dans la conception des technologies permettant la collecte et la centralisation des données et événements opérationnels en temps réel des actifs physiques au sein d'une entreprise);
- Une évaluation en temps réel est effectuée par un modèle utilisant les données récupérées ou calculés par le système PI;
- Si le modèle détecte une anomalie dans les résultats, un processus de maintenance est déclenché et une notification (courriel) est envoyée au responsable de maintenance;
- Si requis, une analyse des données est effectuée par l'entremise d'outils graphiques afin de pouvoir déterminer s'il sera nécessaire de faire créer un bon de travail;
- S'il y a lieu, un bon de travail est créé dans un système de gestion existant tel que la GMAO ou l'ERP, pour exécuter une tâche de maintenance sur l'actif présentant des signes de défaillance potentielle;

- Une fois la maintenance effectuée et le rapport d'intervention créé, le responsable de la maintenance est avisé pour que le processus de maintenance a été complété avec succès.

Le processus peut être déclenché par le dépassement d'un seuil dont les données de surveillance d'état des actifs peuvent provenir de modèles simples basés, par exemple, sur une seule valeur d'actif (températures, viscosité de lubrifiants, vibration, valeur d'écho pour détection par ultrasons, etc.), ou de modèles beaucoup plus complexes basés, par exemple, sur de l'analyse multi-variables. Pour déterminer le seuil, il est possible qu'il dérive des outils plus complexes tels que la création d'un modèle à partir des données de conception de l'actif (en anglais «model-based») ou à partir de l'historique de l'actif (en anglais «data-driven») ou par la combinaison des deux. Les données de conception sont produites par le fabricant tandis que l'historique est constitué des données de surveillance d'état des actifs durant leur cycle de vie, les défaillances, les actions de maintenance, les retours d'expérience, etc. Prendre note, qu'une fois déterminé, le seuil peut être configuré directement par le responsable du service de maintenance.

La surveillance d'état des actifs à laquelle s'ajoute l'analyse et le traitement des données recueillies; la prise de décisions qui en découle pour initier des tâches en vue de corriger la défaillance anticipée, constituent les phases de la maintenance conditionnelle. Lorsque la durée de vie résiduelle des actifs est indiquée, alors il s'agit de la maintenance prédictive.

En outre, la solution //m⁴ permet d'interfacer avec les progiciels de GMAO ou les ERP (Enterprise Resources Planining) en utilisant une couche d'interopérabilité qui est hébergée dans l'infonuagique. La solution //m⁴ est donc une solution qui permet une plus grande flexibilité et une agilité pour mettre en place une maintenance conditionnelle ou prédictive qui peut être centralisée même si les systèmes de GMAO sont distribués sur plusieurs sites de l'entreprise. L'hébergement dans l'infonuagique de la maintenance conditionnelle ou prédictive lui procure tous les avantages de l'infonuagique, notamment, l'élimination des coûts dispendieux d'installation et de maintenance d'infrastructures informatiques, la centralisation et la meilleure gestion des flux d'informations de maintenance.

La solution //m⁴ peut avoir des applications de gestion d'actifs variés dans différents secteurs d'activités: industries chimiques, métallurgiques, pharmaceutiques, les cimenteries, etc).

Les étapes d'implémentation de la solution //m⁴ sont comme suit dans l'ordre (Ouellet, 2013) :

- Cibler les actifs physiques critiques de l'entreprise pour lesquels une implantation de la solution //m⁴ est justifiée;
- Définir les indicateurs clés de performance de la fonction de maintenance de l'entreprise
- Faire la collecte en temps réel des données opérationnelles des actifs;
- Sélectionner le type de modèle prédictif, l'entraîner et le valider;
- Configurer «PI asset framework» (PI AF) pour pouvoir construire des gabarits qui seront utilisés pour effectuer la surveillance d'actifs de même type;
- Définir les conditions de déclenchement du processus (seuils de déclenchement);
- Définir, valider et implanter le processus de maintenance;
- Créer les outils graphiques pour analyser les données afin de fournir un aide additionnelle à la décision;
- Intégrer le(s) système(s) existant(s) tels que, GMAO, ERP, etc.;
- Tester la solution de maintenance conditionnelle ou prédictive;
- Évaluer les indicateurs clés de performance pour évaluer les retombés économiques de l'implantation de //m⁴.

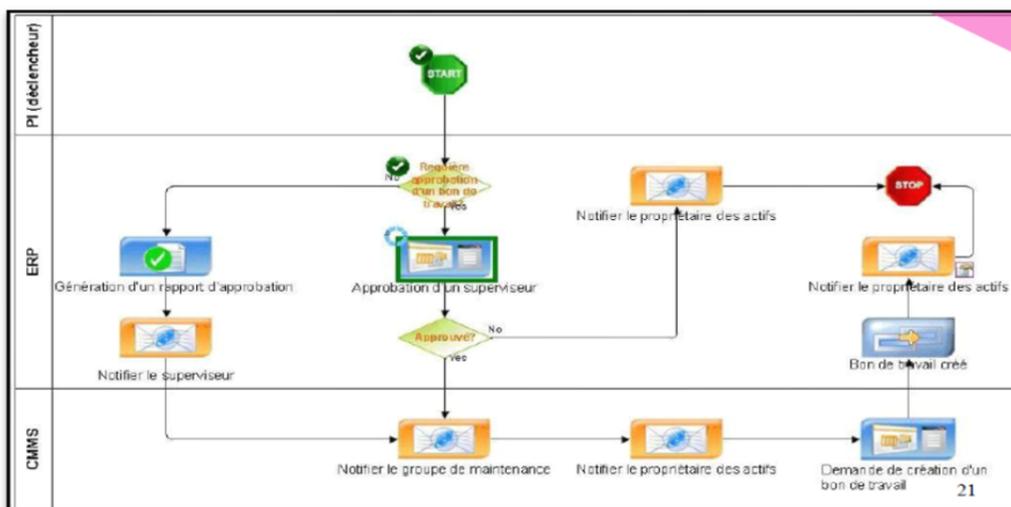


Figure 2.7 Description du déclenchement des processus de maintenance par la solution //m⁴
Tirée de (Ouellet (2013), p.15)

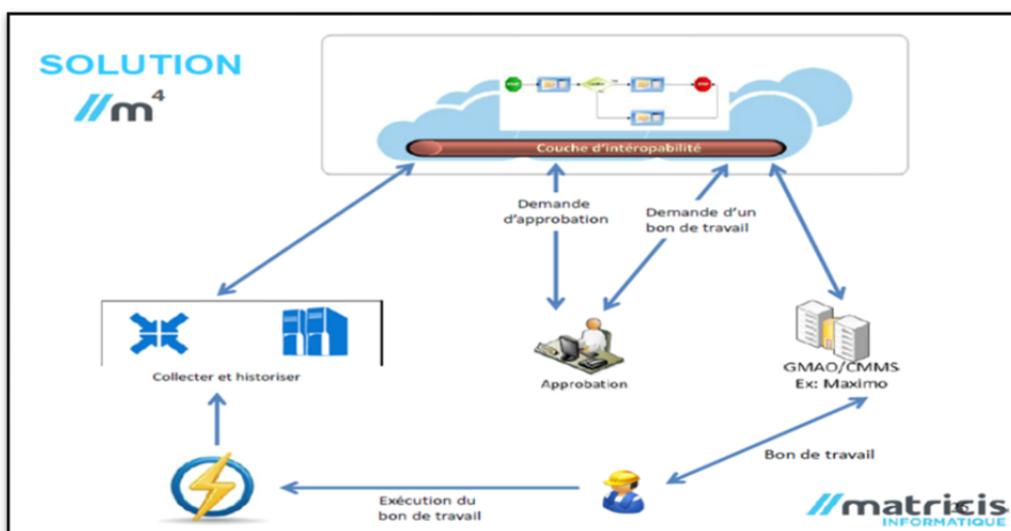


Figure 2.8 Interopérabilité des fonctionnalités de //m⁴ avec d'autres interfaces de l'entreprise
Tirée de ((Ouellet, 2013), p.12)

2.7 Justifier et vendre un choix de politique et de stratégie de maintenance

Il n'y a pas un standard de politique de maintenance applicable à tout type d'actif durant toute sa durée de vie. Le choix de la politique et la stratégie de maintenance doit être justifié et s'aligner obligatoirement sur la politique et la stratégie de l'entreprise. Même si le responsable du service de maintenance ne fait usage des mêmes concepts techniques que la haute direction de l'entreprise, ils doivent avoir un langage commun de prospérité pérennisée de l'entreprise qui est fondé sur l'aspect économique. L'aspect économique doit s'appuyer sur un rapport optimal de coût-bénéfice et coût-efficacité, un respect des normes et réglementations, une qualité irréprochable des produits et services, etc. Il revient donc au gestionnaire de maintenance de choisir une politique et une stratégie de maintenance appropriée en vue de satisfaire aux exigences de la haute direction.

Cependant, compte tenu de l'aspect purement technique et scientifique qu'exige la gestion de la maintenance au sein de l'entreprise, la haute direction ne peut comprendre à priori les retombées et les justifications de choix d'une telle ou telle politique de maintenance. Le responsable de maintenance doit alors en collaboration avec le responsable de la production, vendre son choix éclairé à la haute direction en se basant sur certains critères et indicateurs technico-économiques facilement perceptibles et compréhensibles et ce, en démontrant une gestion optimale des actifs dont il a la charge.

Le choix de politique de maintenance doit être optimal et doit s'appuyer sur la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité, les coûts, la performance du parc d'actifs sous gestion durant leur cycle de vie. Ce choix devra être pensé au premier niveau par le responsable de maintenance en stricte collaboration avec le responsable de la production.

La figure 2.9 montre une zone optimale de coûts entre le correctif et le préventif exécutés sur un actif et est fonction de sa fiabilité opérationnelle, de son historique, de sa sollicitation, des changements de normes et réglementations, de la concurrence, des ressources humaines et

financières disponibles, etc. Cela signifie en réalité qu'un compromis doit toujours être trouvé en maintenance corrective et maintenance préventive.

Toute forme de maintenance est donc applicable pourvu que son choix soit justifié. Par exemple, pour optimiser les ressources investies pour la maintenance des actifs à chaque étape de leur cycle de vie, une maintenance logistique (en anglais: Life Cycle Cost maintenance) peut être utile.

Pour des actifs intelligents de conception complexe et critiques dans une entreprise où la fonction maintenance est très bien organisée, une maintenance prédictive infonuagique peut être adoptée. Elle peut être raffinée à long terme par une maintenance basée sur la fiabilité.

Par contre une simple politique de maintenance corrective sera suffisante pour gérer les actifs peu critiques ou installés dans des entreprises où l'exécution de tâches de maintenance requiert des compétences non disponibles dans l'entreprise, ou encore des actifs dont un remplacement par défaillance seraient préférables aux coûts à consentir pour sa maintenance préventive. Aussi, les entreprises à production de masse recherchant une compétitivité de classe mondiale, peuvent opter pour une TPM.

G. P. Sullivan. et al. (2010) ont suggéré des concepts économiques clés devant tenir lieu de langage commun entre le service de maintenance et la haute direction afin de faciliter la justification et la vente du choix d'une politique de maintenance pour un parc d'actifs donné :

- le ratio entre les coûts globaux d'installation et des bénéfices réalisés durant la première année d'exploitation des actifs : **le bénéfice simple**;
- **le retour sur investissement** qui est le ratio entre des bénéfices réalisés sur les capitaux globaux investis;
- **L'actuelle valeur monétaire nette**: qui représente la différence entre l'actuelle valeur des cash-flows futurs (les brutes d'autofinancement) et les coûts initiaux du projet;

- **Les coûts du cycle de vie** (Life-cycle cost): qui représentent l'actuelle valeur de tous les coûts associés au projet (G. P. Sullivan. et al., 2010).

Par ailleurs, les parties prenantes de l'entreprise peuvent décider d'impartir partiellement ou totalement le service maintenance de leurs actifs. En outre, certaines formes de maintenance telles que la maintenance prédictive infonuagique peuvent avoir leur logiciel de gestion de la maintenance des actifs sous de logiciel Service (SaaS: Software as a Service) par un prestataire de service infonuagique. Les avantages d'une telle impartition de service peuvent être entre autres la réduction des coûts dispendieux nécessaires pour l'installation et la maintenance de la plateforme informatique ainsi que les compétences exigibles pour leur gestion.

Ainsi, si l'entreprise se tourne vers un prestataire de service, elle ferait plus d'économies en faisant des abonnements pour des facturations soit par utilisateur soit par utilisation. C'est un projet comme tout autre qui nécessite un investissement afin d'évaluer les aspects coûts-avantages et coûts-efficacité. Il est donc nécessaire de suivre une démarche technico-économique rigoureuse permettant d'aboutir à une justification de l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique. Le prestataire de service aussi bien que le responsable de maintenance doit suivre cette démarche de justification technico-économique. Le prestataire de service la suivra pour convaincre le responsable de maintenance et le responsable de la production à adopter une politique de maintenance donnée dont les avantages sont parfois peu connus par les décideurs. Le responsable de maintenance ainsi que de la production devront être convaincus de la justification du choix de la politique de maintenance pour amener la haute direction à donner son aval et fournir les investissements et le soutien nécessaires à son adoption.

Dans un tel contexte, l'élaboration d'un référentiel multicritère technico-économique pour illustrer et rendre palpables les opportunités technico-économiques de l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique afin d'aider à un changement de politique de maintenance est donc nécessaire. Cette démarche s'appuie sur une comparaison des

différentes formes de maintenance les plus connues: correctif, préventif systématique et préventif conditionnel. En outre, elle doit se fonder sur des aspects coûts, qualité, ressources humaines, santé et sécurité, disponibilité, fiabilité, cycle de vie, indicateurs de performance, la compétitivité, la concurrence. Enfin, un changement de politique de maintenance doit avoir un impact positif sur la gestion des actifs. Ainsi, la nouvelle politique de maintenance retenue doit permettre de saisir des opportunités d'amélioration des systèmes de gestion des actifs de l'entreprise (GMAO, ERP, EAM, etc.).

Enfin, une mesure de la performance de la gestion de maintenance pourra servir d'arbitre entre les parties prenantes de l'entreprise.

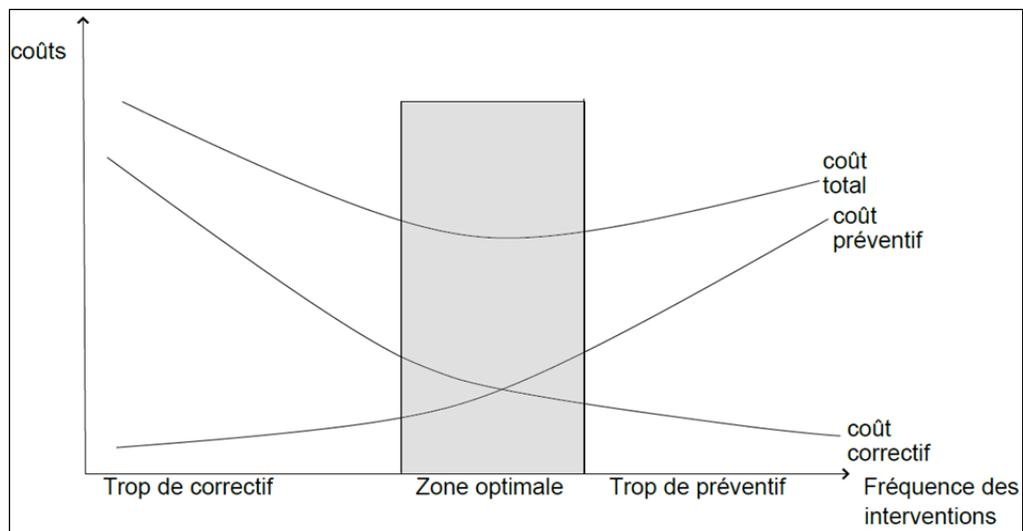


Figure 2.9 Nécessité de trouver un équilibre entre correctif et préventif
Tirée de Deloux, Castanier et Berenguer (2012), p.15)

Résumé du deuxième chapitre

Dans ce chapitre 2 de ce mémoire, nous avons examiné les concepts utiles dans l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique. Puisque cette forme de maintenance est une forme très évoluée de la fonction maintenance au sein de l'entreprise, nous avons fait le tour des différentes formes de maintenance qui sont adoptables par toute entreprise. Ensuite nous avons expliqué la maintenance hébergée dans l'info nuage avec ses avantages. Nous avons examiné les différentes technologies de maintenance prédictive ainsi que leurs différentes applications sur les actifs industriels. Le cas particulier d'une application biomédicale et hospitalière a été abordé. Puisque l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique doit être bien justifiée et doit s'aligner sur la politique de l'entreprise, il est nécessaire que le service de maintenance en collaboration avec le service de la production de l'entreprise parle un langage économique approprié pour vendre cette politique à la haute direction. Ainsi, nous avons examiné les indicateurs de performance ainsi que les termes technico-économiques sur lesquels fonction maintenance et fonction production doivent s'appesantir. Ce langage de justification technico-économique est le même que celui de tout prestataire de service voulant amener les responsables de l'entreprise à l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique. La GMAO a pour fonction la gestion informatisée de la fonction maintenance, et doit englober la gestion de la maintenance prédictive, Mais avec l'adoption de la maintenance prédictive certaines insuffisances de la maintenance prédictive affectent les fonctionnalités des GMAO dont les coûts d'acquisition et de maintenance sont assez dispendieux et entraînent une incohérence temporelle entre les deux concepts qui devraient être complémentaires. Ainsi, nous avons analysé comment en hébergeant la maintenance prédictive dans un environnement infonuagique elle devient plus avantageuse à être adoptée et son interopérabilité avec la GMAO enrichit les fonctionnalités de cette dernière pour le bien d'une gestion optimale des actifs de l'entreprise. Enfin une description de la solution //m⁴ de Matricis informatique Inc qui s'inscrit bien dans la logique d'enrichissement des fonctionnalités de GMAO par la maintenance conditionnelle ou prédictive infonuagique, a été faite.

Enfin, une analyse des opportunités technico-économiques que présente l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique pour enrichir les fonctionnalités des progiciels de GMAO a été faite sans toutefois concevoir la trousse de ces opportunités technico-économiques. Cette conception serait le cœur du troisième chapitre.

CHAPITRE 3

ÉLABORATION DE LA TROUSSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE POUR FACILITER L'ADOPTION D'UNE MAINTENANCE PRÉDICTIVE INFONUAGIQUE

Après avoir passé en revue l'impact de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques dans le premier chapitre ainsi que les enjeux liés à son adoption par les entreprises, nous avons posé des hypothèses sur la solution d'aide à la compréhension des opportunités technico-économiques afin de saisir l'aubaine qu'elles présentent.

Dans notre deuxième chapitre, nous avons exploré les concepts utiles dans l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique.

Dans ce troisième chapitre, nous allons dans un premier temps déterminer les conditions favorables ainsi que la démarche générale pour l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique. Pour cela, nous examinerons le niveau de maturité de la fonction maintenance des entreprises, le niveau de criticité de ses actifs ainsi que de leurs composants ou modules critiques et ce, dans le but d'appliquer une maintenance prédictive infonuagique à un composant ou module critique d'un actif critique patrimoine d'une entreprise éligible. Dans un second temps, nous allons analyser les aspects techniques et économiques de la fonction maintenance afin d'établir la notion de rapport coût-efficacité et coût-avantages.

Enfin nous allons déterminer et définir les indicateurs de maintenance permettant d'élaborer une trousse technico-économique pouvant aider à évaluer, suivre et améliorer au besoin la performance de la fonction maintenance avant et après changement de politique de maintenance, en l'occurrence avant et après adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique.

3.1 Critères de qualification d'une entreprise pour l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique

Pour qu'une entreprise soit éligible, il est nécessaire de l'examiner par certaines macros questions pouvant indiquer si un examen approfondi de ses actifs est nécessaire. Un niveau de qualification pour chaque critère d'examen sera établi sur une échelle de 1 à 4 (1= nulle, 2= faible, 3= moyen, 4= Excellent). Les questions peuvent être nombreuses et diversifiées. Nous allons nous limiter à l'essentiel. Ainsi :

- *Sur le plan organisationnel et la maturité de la fonction maintenance* : le but visé ici est d'évaluer le niveau de maturité de l'entreprise sur le plan organisationnel et sur le plan de gestion de la fonction maintenance. La raison de cette question est qu'en réalité l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique ne peut être effective que si la fonction maintenance dispose par exemple des historiques des actifs, d'une bonne gestion des stocks des pièces de rechange, d'une documentation pertinente sur les actifs, si nécessaire d'un système de GMAO, d'une hiérarchisation de la fonction maintenance facilitant le déroulement des processus de maintenance et de l'exécution des tâches de maintenance, etc.
- *Sur le plan technique* : il est important d'avoir une vue d'ensemble du parc matériel à maintenir, de sa composition et son ampleur. Les types d'équipements doivent être bien inventoriés afin de pouvoir définir les plus critiques. De même leur âge moyen par rapport au cycle de vie ou encore l'âge moyen de remplacement économique devra être déterminé.
- *Sur le plan économique et financier* : il est essentiel de savoir si l'entreprise dispose des données sur les différents coûts directs et indirects de maintenance, les différents investissements en maintenance, les coûts d'assurance, les données de sur les budgets en maintenance et de la capacité d'investir dans l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique.

- *Sur le plan de ressources humaines et compétences* : l'implantation de la maintenance prédictive infonuagique exige des ressources compétentes ainsi que leur volonté de vouloir le changement. Il est donc important d'examiner si la disponibilité de ressources qualifiées en interne ou en externe (dans le cas d'une impartition d'un certain nombre de tâches de maintenance de l'entreprise).
- *Sur le plan du respect des normes* : l'examen du respect des normes et des réglementations permet de juger de l'importance que l'entreprise accorde à la santé et sécurité au travail mais aussi au respect de la protection de l'environnement.
- *Niveau de maturité de la gestion des technologies de l'information* : l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique induit un changement radical dans l'infrastructure informatique et de télécommunication de l'entreprise. En outre, elle impacte également le traitement de l'information et le processus de maintenance. C'est pourquoi il est important de juger le niveau de maturité des technologies de l'information de l'entreprise.
- *Ressources matérielles en maintenance et logistique* : l'exécution des tâches de maintenance qui initient les précieuses données du processus de maintenance prédictive infonuagique exigent des outillages et une logistique adéquats pour leur bonne réalisation. Il est donc essentiel que toute entreprise aspirant à la maintenance prédictive infonuagique dispose de ressources matérielles et logistiques nécessaires.

En résumé, le tableau A II-1 de l'annexe II regroupe quelques macros questions qui peuvent permettre de prendre une décision sur la qualification ou non d'une entreprise candidate à l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique.

3.2 Niveau de criticité d'un actif et de ses composants éligibles à la maintenance prédictive infonuagique

Selon le PAS 55 de l'Institute of Asset Management (2008), un actif est considéré comme étant critique si cet actif, suivant les objectifs de l'entreprise, a un impact sur l'efficacité, la

flexibilité, les coûts ou lorsque sa défaillance affecte la performance de l'entreprise. Le niveau de criticité traduit donc la variabilité du niveau de l'importance des actifs d'une entreprise et oriente les décisions des investissements. Mais dans la décision de l'adoption d'une politique de maintenance donnée, il s'agit non pas de faire une classification hiérarchique des actifs entre eux, mais plutôt de déterminer si un actif éligible à un niveau de criticité très élevé ou encore parmi deux actifs critiques donnés appartenant au parc machine de l'entreprise, lequel prioriser dans l'adoption de la politique de maintenance prédictive infonuagique.

Notons que deux niveaux de criticité sont à considérer dans la détermination du niveau de criticité des actifs au sein de l'entreprise :

- Le niveau de criticité d'une unité ou d'un actif dans une vue d'ensemble du parc matériel de l'entreprise que nous pouvons désigner par criticité au niveau macro,
- Le niveau de criticité des composants ou modules d'un actif critique que nous pouvons désigner par criticité au niveau micro (Candreva et Houari, 2013).

De façon plus concrète, quatre aspects de niveaux de criticité sont à prendre en compte pour désigner tout actif critique ou pour faire bénéficier ses modules ou ses composants d'une politique de maintenance prédictive infonuagique. Il s'agit de la criticité du point de vue de la production, la criticité du point de vue de la maintenance, la criticité du point de vue sécurité et environnement et enfin la criticité selon l'âge de l'actif.

3.2.1 Criticité point de vue production

La production au sein de l'entreprise traduit la qualité et la quantité de produits ou de services générés par l'exploitation des actifs. Tout actif dont la défaillance ou l'indisponibilité affecte la qualité ou la quantité de produits ou de service, sera considéré comme critique. De même, un actif dont le taux d'engagement ou d'exploitation est élevé sera dit actif critique. Le niveau de criticité en production d'un actif peut varier suivant le niveau de tolérance à la défaillance de tel actif. Par exemple, si son arrêt peut bloquer totalement la production et sa remise en service doit être immédiate, alors cet actif est

critique point de vue de la production et son niveau de criticité sera considéré comme étant très élevé. À l’opposé, si à la défaillance de l’actif, l’arrêt partiel de la production est toléré pour sa réparation, ou que sa remise en service peut être retardée, alors son niveau de criticité est moyen. Le niveau de criticité sera considéré comme étant nul si l’arrêt de l’actif n’a aucun effet sur la production.

En somme deux questions essentielles devront être posées pour évaluer le niveau de criticité de l’actif du point de vue de la production à savoir :

- La durée d’arrêt admissible sans un impact majeur sur les objectifs de l’entreprise (quantité ou qualité de production ou de service par exemple),
- en cas de dysfonctionnement de l’actif, ce dernier peut-il être substitué par un autre actif, même temporairement? (Albrice, 2014)

Pour qu’un actif ou son composant soit éligible à la maintenance prédictive infonuagique, il faut qu’il ait un niveau de criticité très élevé.

3.2.2 Criticité point de vue maintenance

La remise en état de bon fonctionnement d’un actif implique entre autres des coûts de maintenance (directs et indirects), et des temps de maintenance.

Lorsque les coûts de remise en service et/ou le temps de maintenance sont élevés (soit parce que l’actif est trop fragile, trop complexe, etc.), alors l’actif concerné est considéré comme critique pour la maintenance et le niveau de criticité de ses composants peut être examiné pour voir si la maintenance prédictive infonuagique peut être appliquée à ses modules ou à ses composants.

3.2.3 Criticité point de vue sécurité et environnement

La sécurité et la protection de l’environnement sont incontournables pour la gestion de l’entreprise. Tout actif dont la défaillance nuit à la sécurité opérationnelle ou à des effets

néfastes sur l'environnement, est considéré comme un actif critique du point de vue sécurité et environnement.

3.2.4 Niveau de criticité selon l'âge de l'actif

Tous les actifs ont une durée de vie. Suivant la courbe de défaillance en baignoire de tout actif à dégradation continue, le taux de défaillance est fonction de la période de vie considérée (rodage, maturité, vieillesse) de l'actif. Plusieurs études ont été faites sur le remplacement systématique ou conditionnel suivant l'âge des composants d'un actif critique témoignant de la corrélation qui existe entre l'âge de l'actif et sa fiabilité opérationnelle. Un équipement vieillissant peut avoir des répercussions non seulement sur la production et les coûts en maintenance, mais aussi peut avoir des conséquences graves sur la sécurité et l'environnement. Les risques relatifs aux industries terrestres vieillissantes sont considérables et occasionnant des pertes et des incidents importants. (Candreva et Houari, 2013). Ainsi, il est nécessaire de considérer l'âge comme critère pour définir le niveau de criticité de l'actif ainsi que celui de ses composants ou de ses modules.

3.2.5 Classification hiérarchique du niveau de criticité des actifs ou de leurs composants

La description du niveau de criticité énumérée (en production, maintenance, sécurité, âge), est applicable à tout actif de l'entreprise ainsi qu'à leurs composants. Mais, dans le cas où l'entreprise dispose de plusieurs actifs critiques ou encore lorsque pour chaque actif critique plusieurs composants constitutifs critiques sont dénombrés, il est nécessaire de définir une hiérarchisation selon le niveau de criticité. Dans ces cas, il devient donc indispensable de procéder à une classification hiérarchique des divers actifs critiques ainsi que de leurs composants afin de désigner dans l'ordre ceux sur lesquels l'investissement en maintenance prédictive infonuagique sera prioritaire.

Plusieurs méthodes de classification hiérarchique suivant plusieurs critères existent. Nous avons par exemple la méthode de Pareto, la méthode AHP (Analytic Hierarchic Process), la méthode PIEU (P= Incidence de la panne point de vue technique, économique, sécurité et

environnemental, I= incidence de la panne sur la production, E= État de l'actif, son âge, U= taux d'utilisation de l'actif) (Diallo, Ait-Kadi et Chelbi, 2008) et bien d'autres. Chaque méthode pourra être choisie suivant le contexte et les buts visés dans l'étude de criticité. Une méthode similaire à la méthode PIEU par exemple permet de croiser plusieurs critères à la fois. Ainsi si nous désignons par N_c l'indice de criticité alors :

$$N_c = C_p \times C_m \times C_s \times C_a \quad (3.1)$$

Où

N_c = indice de criticité

C_p = criticité point de vue production

C_m = criticité point de vue maintenance

C_s = criticité point de vue sécurité et environnemental

C_a = criticité point de vue âge

Ensuite comme dans le cas de la méthode PIEU, les actifs ou leurs composants pourront être classifiés de façon hiérarchique.

Dans le cas où de deux actifs ont les mêmes indices de criticité, il serait indispensable de considérer des sous fonctions soutenant chaque fonction. Autrement dit, la criticité du point de vue production, de maintenance, de sécurité ou de l'âge peuvent être décomposée en sous fonctions composites. Par exemple, pour la criticité en maintenance les temps et les coûts en maintenance peuvent servir de sous-critères permettant de raffiner l'étude. Les temps et les coûts peuvent aussi être aussi à leur tour décomposés en d'autres sous fonction au besoin.

3.3 Arbre décisionnel du choix d'une politique de maintenance prédictive infonuagique pour le composant ou le module d'un actif critique

Étant entendu que la politique de maintenance définit les directives et les objectifs globaux de la fonction maintenance de l'entreprise, son changement est une décision capitale qui devra être justifiée. Le changement de politique de maintenance nécessite un investissement approprié qui peut être coûteux. En outre il peut demander un changement radical des

habitudes de tout le personnel et modifier de façon notable l'organisation du travail au sein de l'entreprise. En définissant une politique de maintenance le service de maintenance en concertation avec la production entend démontrer une possibilité d'optimiser l'efficacité et l'efficience c'est-à-dire la performance des actifs dont il a la charge. En réalité, le service de maintenance veut démontrer à la direction les avantages technico-économiques et un retour sur investissement qui sous-tendent son projet. La direction quant à elle, en acceptant le changement de politique de maintenance, entend faire un investissement dont elle exige un bénéfice final en terme financier tangible. De ces deux approches (du service de maintenance et de la haute direction), il est incontournable que le service de maintenance vende son projet à la haute direction qui doit l'approuver et le financer comme nous avons expliqué au chapitre 2 de ce mémoire.

Retenons que choisir une politique de maintenance est une démarche assez complexe. En particulier, la maintenance prédictive infonuagique étant une politique de maintenance très évoluée, il est important que la fonction maintenance soit bien organisée à l'avance. Les 19 facteurs suivants influencent le choix d'une politique de maintenance :

- la qualité de service attendue,
- le risque,
- l'usure de l'équipement, la formation du personnel,
- le défaut du produit,
- les effets ou l'impact sur l'environnement,
- le temps de mise en service de l'équipement,
- la rémunération du personnel, la satisfaction du client,
- l'efficacité du personnel et de l'équipement,
- les dommages possibles sur le personnel,
- la qualité du produit, la fiabilité,
- les coûts du logiciel, les coûts du matériel (hardware),
- les facilités du matériel (hardware),
- les facilités (opérationnelles) du logiciel,
- la sécurité opérationnelle de l'équipement,

- la qualification des ressources humaines, (Zaeri et al., 2007).

En outre, certaines politiques de maintenance de par leur adoption répandue dans le monde industriel, peut faciliter la tâche au service maintenance dans sa démarche de convaincre la haute direction. Par contre, des concepts nouveaux tels que la maintenance prédictive infonuagique dont le concept est peu connu par les entreprises, nécessite un guide éclairé afin de faciliter son adoption.

Pour choisir une politique de maintenance prédictive infonuagique, nous proposons ici un arbre décisionnel succinct ou du moins un chemin décisionnel (puisque'il ne fait pas allusion aux autres formes de maintenance), comportant des critères permettant de définir une politique de maintenance prédictive infonuagique pour les composantes d'un actif donné. Dans cette Figure A I-1 citée en annexe II de ce mémoire, nous avons considéré l'âge et le taux de défaillance (λ) qui sont deux fonctions essentielles pouvant orienter la politique de maintenance puisque qu'elles ont un impact direct sur la production, les coûts et les temps en maintenance, la sécurité.

En somme, la recherche d'actif ou de composant d'actif critique en vue d'appliquer une politique de maintenance est une démarche graduelle dans l'ordre suivant :

- sélection d'une entreprise suivant des questions macro de qualification pour une éventuelle adoption de maintenance prédictive infonuagique,
- détermination du niveau de criticité d'un actif au niveau de l'ensemble des actifs de l'entreprise retenue (niveau macro),
- détermination dans l'ordre de priorité d'investissement en maintenance prédictive infonuagique les composants ou modules critiques d'un actif sélectionné comme critique,
- utiliser l'arbre décisionnel pour conclure si le composant de l'actif critique peut bénéficier d'une politique de maintenance prédictive infonuagique.

3.4 Aspect technique de la fonction maintenance- Gestion technique des parcs d'équipements

Le but ultime de la fonction maintenance est de mettre tout en œuvre pour réduire au maximum les défaillances et augmenter la fiabilité opérationnelle afin de rentabiliser les efforts consentis dans l'exploitation du bien. Pour atteindre ce but, la fonction maintenance doit intervenir depuis la conception du bien jusqu'à sa disposition. La mission technique de la fonction maintenance repose sur les aspects de gestion technique durant tout le cycle de vie de l'actif.

C'est donc une mission complexe qui couvre les activités de suivi technique des équipements (installation, diagnostic de défaillance, ordonnancement et exécution des tâches de maintenance, gestion des pièces de rechange, santé et sécurité dans l'exécution des tâches de maintenance etc.).

Dans une entreprise bien organisée, la fonction maintenance se compose de trois fonctions qui sont : la fonction études et méthodes, la fonction préparation et ordonnancement et la fonction réalisation (AFNOR, 2002).

De façon succincte, la fonction étude s'occupe de la conception dans le processus de gestion de la maintenance. Elle étudie par exemple de nouveaux projets ou encore les défaillances observées sur les actifs, analyse leurs causes et les actions nécessaires pour y remédier. C'est la fonction étude qui définit la politique de maintenance à adopter pour les actifs du parc machine sous maintenance. Concrètement la fonction étude analyse les besoins et prend une part active au cahier de charges des investissements, définit les articles nécessaires en maintenance, étudie les méthodes et les moyens pour optimiser la performance des biens, définit la politique de maintenance et analyse les retours d'expérience afin de mieux les intégrer dans la maintenance des biens (AFNOR, 2002).

Le bureau préparation et ordonnancement se charge de préparer et de planifier les activités de maintenance en se basant sur les données produites par le bureau étude. Il identifie les

besoins et les moyens nécessaires pour planifier les activités de maintenance de façon appropriée sans nuire aux autres fonctions de gestion de l'entreprise telles que la production et tout en intégrant le respect strict des normes de sécurité.

Quant au bureau de réalisation, il exploite les données produites par les fonctions études et ordonnancement pour rassembler les moyens nécessaires à l'exécution des activités de maintenance. En outre il produit les rapports après exécution des activités de maintenance. Notons que ces trois sous-fonctions travaillent en étroite collaboration. Dans certaines entreprises, deux ou même les trois fonctions sont confondues.

Par ailleurs, il est important de souligner que le cœur de la mission technique de la fonction maintenance est l'inventaire (Organisation mondiale de la santé, 2012). En effet, l'inventaire représente est le point de départ dans la gestion technique d'un parc d'équipements. La figure 3.1 ci-dessous montre la puissance de l'inventaire et son impact sur les composantes de l'entreprise.

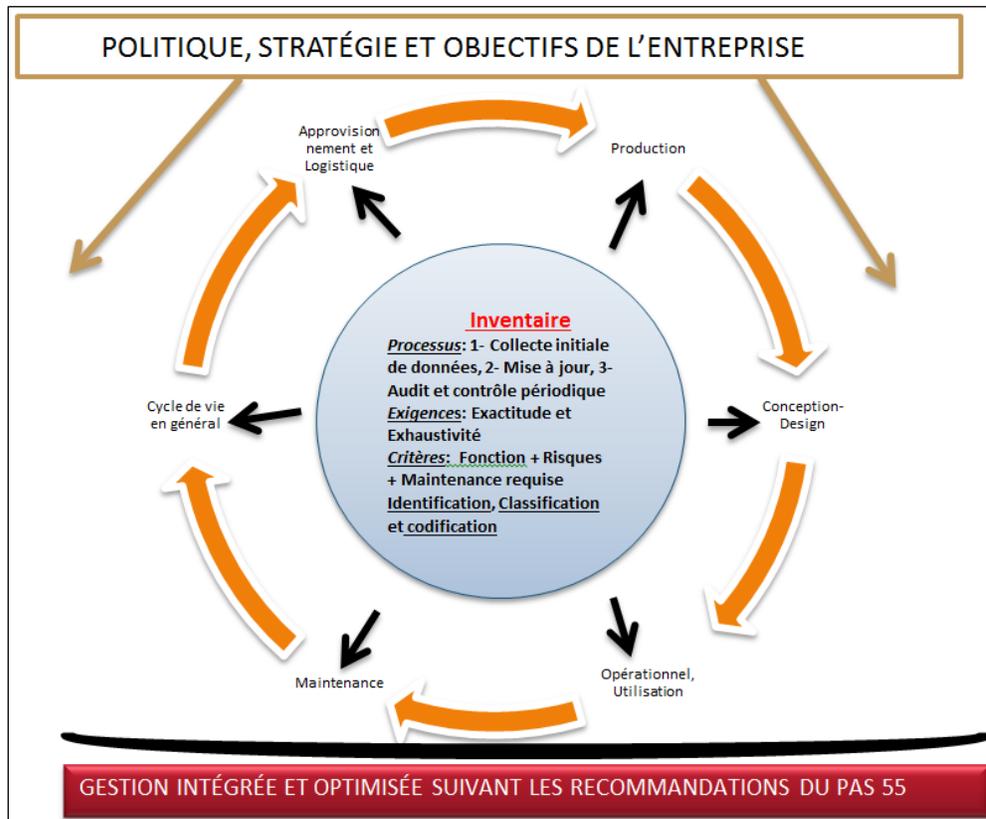


Figure 3.1 Schéma global de la gestion technique de parcs d'équipements
Inspirée de (Organisation mondiale de la santé (2012), p.9)

Description succincte du Schéma

Cette description est inspirée de la série technique de l'Organisation mondiale de la santé (2012). Le cœur et le socle de la gestion d'un parc d'équipements est l'inventaire. Il représente la phase initiale dans toute gestion de parc d'actifs. L'efficacité de la gestion technique d'un parc d'équipements est tributaire de l'inventaire même si ce dernier ne suffit pas certes à lui seul pour rendre la gestion efficace. Cependant, il est le point de départ devant être perfectionné régulièrement. L'inventaire est un cycle ou un processus composé de trois étapes :

- La collecte initiale des données sur les actifs du parc;
- La mise à jour des données en cas par exemple d'ajout de modification des données du parc;

- L'audit ou contrôle périodique qui permet de contrôler à intervalle de temps régulier (temps calendaire aux six mois ou aux 12 mois par exemple) l'inventaire de départ afin d'y apporter au besoin des corrections ou des améliorations.

L'exactitude et l'exhaustivité de l'inventaire sont cruciales et sont exigées pour un inventaire fiable. Dans le processus de l'inventaire les équipements doivent être identifiés, classifiés et codifiés. Les critères à considérer pour définir quel équipement inventorié peuvent varier d'une entreprise à une autre selon des critères de base. L'inventaire est un outil puissant qui dicte la performance de la gestion d'un parc d'équipements et de la pérenniser.

Une fois le parc bien inventorié, il reste à exploiter les précieuses et précises informations collectées pour agir sur les autres fonctions qui font partie intégrante de la gestion d'un parc d'équipements qui sont décrites de façon succincte comme suit :

- *Conception-Design* : les informations de l'inventaire peuvent servir à mieux examiner la nécessité ou l'obligation de modifier le design ou la conception d'un actif existant ou en voie d'acquisition, face aux normes ou encore par rapport aux contraintes environnementales et la sécurité d'exploitation de l'actif, ou encore par rapport au niveau de sollicitation de l'actif par la production, etc.
- *Approvisionnement et logistique* : le service d'approvisionnement et de logistique ne peut être efficace s'il ne connaît pas le nombre et la qualité de nouveaux ou anciens équipements ou de pièces de rechange dont il a la gestion. Ainsi, l'inventaire est bien l'outil sur lequel il peut se baser pour examiner et définir les moyens à déployer en logistique (le flux sanguin de l'entreprise) ou pour l'acquisition du nouveau matériel.
- *La production* : mieux connaître la composition exacte du parc matériel permet d'avoir une meilleure vue des chaînes de production, de définir les maillons faibles ou forts éventuels afin d'agir efficacement sur la productivité de la fonction production. En outre, l'inventaire peut permettre de prévoir la qualité des produits et services, de définir la quantité de produits ainsi que les contraintes de production, d'évaluer le besoin d'ajout ou

de retrait de la chaîne de production d'un équipement, de mieux évaluer le rendement de chaque équipement, etc.

- *Utilisation (aspect opérationnel)* : la sécurité d'exploitation, la formation du personnel manipulateur, les conditions environnementales d'utilisation, le respect des normes de santé et sécurité d'exploitation pour prévenir les accidents, etc., seront définis en fonction de la composition du parc matériel, et donc des données de l'inventaire. La performance opérationnelle utilisera comme données de départ les données d'inventaire.

- *Maintenance* : la fonction maintenance dans l'entreprise ne peut fixer aucune politique de maintenance sans avoir une vue précise et détaillée du parc matériel à entretenir. La politique de maintenance ainsi que la stratégie de maintenance à adopter dépendent strictement de la composition du parc. La décision d'impartir un service ou de sous-traiter la maintenance des équipements dépend de l'inventaire des équipements du parc aussi. De même, ce sont les données d'inventaire du matériel du parc d'équipements qui permettront de définir le niveau de maintenance acceptable pour l'entreprise, la nécessité de former les ressources en maintenance, la quantité des pièces de rechanges à mettre en place pour les opérations de maintenance, les outils de maintenance, le matériel de sécurité pour le personnel de maintenance, etc.

- *Cycle de vie en général* : de la conception à la mise au rebut des équipements en passant par la durée de vie utile, les données d'inventaire seront incontournables. Tout actif inventorié a une durée de vie. Lorsque survient la fin de sa durée de vie, sa disposition ne peut se faire sans les données d'inventaire faisant partie de son historique et pouvant définir dans quelles conditions l'équipement doit être stocké ou détruit. Des conditions réglementaires et technico-économiques peuvent s'appliquer en fonction du type d'équipement et de leur nombre.

- *Gérer le parc d'équipements en fonction de la politique, la stratégie et les objectifs de l'entreprise concernée.*

Aucune gestion d'aucun département ou service d'une entreprise ne peut se faire sans l'accord et le soutien de la haute direction. Toute initiative, toute décision, tout choix de politique et de stratégie au niveau de chaque service de l'entreprise, doivent être strictement alignées avec la politique, la stratégie et les objectifs de l'entreprise. La gestion du parc d'équipements ne déroge donc pas à cette règle. Ce pourquoi ce volet a été représenté comme un "chapeau" qui coiffe le cycle de gestion du parc d'équipements. La politique représente les directives fixées par les parties prenantes de l'entreprise au haut niveau tandis que la stratégie représente les moyens et les méthodes à mettre en œuvre pour atteindre la politique de l'entreprise.

- Enfin, *gérer le parc d'équipements suivant les recommandations du PAS 55.* Il s'agit de façon succincte de faire une gestion intégrée et optimisée de toutes les fonctions du cycle de gestion du parc dans une vue holistique et non gérer chaque département séparément. C'est le fondement de la recommandation du PAS 55. En ce sens, la gestion budgétaire et financière impliquant les budgets, les coûts, les retours sur investissements sont à considérer non seulement au sein de chaque fonction du cycle de gestion du parc, mais aussi doivent s'aligner sur les directives financières définies lors de l'établissement de la politique de l'entreprise.

3.5 Les processus de maintenance

Un processus est un ensemble d'activités corrélées et interactives qui utilise des ressources pour convertir des intrants (éléments d'entrée) en extrants (éléments de sortie) (Organisation internationale de normalisation, 2000). C'est donc un système dynamique qui pose la question "quoi faire".

Tout service de maintenance doit définir clairement des processus efficaces de maintenance. Les processus de maintenance sont variés et peuvent être complexes mais doivent avoir une cartographie claire pour une exploitation efficace.

Pour les processus des interventions en maintenance par exemple, Blaise et Liévin (2008) de l'Institut National de Recherche scientifique au Canada (INRS) propose une cartographie du processus général d'intervention de maintenance en cinq étapes: *déclencher*, *diagnostiquer*, *préparer et ordonnancer*, *intervenir sur l'équipement*, *collecter les informations*. Notons que les composantes de chaque processus peuvent être considérées comme des sous-processus du processus principal.



Figure 3.2 Schéma concis des processus de maintenance
Inspirée de (Blaise et Liévin (2008), p.5)

3.6 Aspect économique de la fonction maintenance

L'aspect économique ou financier de la fonction maintenance se rapporte à l'analyse des besoins financiers en maintenance, l'élaboration d'un budget de maintenance et l'analyse de retour sur les capitaux investis en maintenance. En d'autres termes, l'aspect économique de la fonction maintenance s'intéresse aux pertes ou aux profits par rapport aux investissements faits en maintenance. Il évalue la santé financière de chaque actif sous maintenance, de l'ensemble du parc d'actifs ainsi que celle de toutes composantes de la fonction maintenance telles que la gestion des stocks, l'impact financier de la santé et sécurité au travail, les ressources humaines, la production, etc.

La mission économique de la fonction maintenance est d'augmenter la disponibilité des actifs par une réduction maximale des défaillances et des coûts liés aux arrêts des actifs, afin

d'optimiser de façon quantitative et qualitative la production. Une fonction maintenance économique doit donc minimiser les coûts d'exploitation, les coûts de la main d'œuvre, les coûts de pièces de rechange et de la logistique, les coûts dus aux accidents de travail, etc.

En somme, les intérêts économiques de la fonction maintenance seront atteints si les coûts de gestion de la maintenance sont réduits au maximum sans nuire à son efficacité. Il est donc nécessaire d'analyser et d'optimiser le rapport coût-efficacité et coût-avantages de la fonction maintenance.

3.7 Aspect sécurité et impact environnemental de la fonction maintenance

La santé et la sécurité au travail sont deux contraintes dont est assujettie toute entreprise et dont la rigidité de tolérances-zéro est sauvegardée par les normes et les réglementations.

De même, la protection de l'environnement est régie par des normes et des lois fermes dont les entreprises ne peuvent faire fi. Une fonction de maintenance efficace doit veiller au respect strict des normes et lois en vigueur et minimiser les coûts d'assurance. En outre, la fonction maintenance doit réduire au maximum le nombre d'accidents liés directement ou indirectement à la maintenance.

Par ailleurs, la santé et la sécurité au travail, aussi bien que la protection de l'environnement, sont des concepts qui permettent le développement durable. En effet, les efforts déployés pour le respect strict de la sécurité et la protection de l'environnement sont loin d'être vains et présentent différents avantages intrinsèques et extrinsèques à l'entreprise. Ils se décomposent en deux catégories suivantes :

- ceux définissant l'écoconception : mobilisation de l'équipe, la conception de produits qui consomment moins d'intrants, l'image à l'externe de l'entreprise etc.),
- ceux définissant l'éco protection : efficacité opérationnelle, l'organisation du travail, les nouveaux processus d'intervention etc. (Duhamel et Daoust, 2013).

Enfin, pour mieux analyser, suivre et maîtriser la santé, la sécurité et la protection de l'environnement différents indicateurs et des ratios sont utiles.

3.8 Description de l'approche coût-efficacité et coût-avantages (ou coût-performance) de la fonction maintenance

Nous avons expliqué un peu plus haut les aspects techniques de la fonction maintenance, les aspects économique de la fonction maintenance et la santé la sécurité et la protection de l'environnement. Mais tous ces aspects sont intimement liés entre eux et convergent tous vers des objectifs qui sont d'avoir une maintenance efficace et efficiente, c'est-à-dire une maintenance performante.

Cependant, l'exécution des activités décrivant chaque concept de la maintenance (technique, économique, santé et sécurité) est consommatrice de ressources et des coûts. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre les ressources investies et les coûts générés d'une part et les bénéfices ou encore des retombées d'efficacité prouvée de la maintenance, d'autre part. En réalité, il s'agit d'évaluer de façon régulière les rapports coût-efficacité et coût-avantage de la fonction maintenance.

L'Analyse Coût-Efficacité (ACE) cherche à comparer les résultats de l'objectif fixé aux coûts pour atteindre ces résultats. Tandis que l'analyse coût-avantage (Analyse Coût-Bénéfice ACB de l'anglais cost benefit analysis) permet de comparer les coûts investis pour atteindre un objectif donné par rapport au bénéfice (en terme monétaire) générés par ces résultats. Elles sont toutes deux des outils d'aide à la décision.

L'examen de la fonction maintenance par la méthode coût-efficacité peut par exemple permettre de juger de l'efficacité d'une politique de maintenance en évaluant les coûts d'adoption de cette politique (coûts initiaux et coûts de gestion) par rapport aux résultats obtenus. Cette évaluation peut se baser sur des ratios prédéfinis. De même, l'analyse coût-efficacité peut permettre de comparer deux politiques de maintenance afin de juger de l'efficacité de changement de politique de maintenance.

Corrélativement, une analyse coût-bénéfice établit une jauge entre les coûts déployés dans l'adoption d'une politique de maintenance et les bénéfices obtenus en terme monétaire obtenus. Notons cependant que, dans le cas de l'analyse coût-bénéfice, le fait de se focaliser sur les valeurs monétaires donne une vue trop restreinte de l'analyse contrairement à l'analyse coût-efficacité.

Enfin, une définition claire et précise d'indicateurs ou de ratios peuvent permettre de décomposer les analyses coût-efficacité et coût-bénéfice de la fonction maintenance.

3.9 Référentiel multicritère technico-économique

Le choix d'adopter une politique de maintenance prédictive infonuagique représente une ascension vers une nouvelle politique de maintenance au dépend d'une ancienne dans le but d'optimiser la performance de la fonction maintenance. Nous avons vu plus haut que la maintenance prédictive infonuagique doit s'appliquer aux actifs critiques. En outre, le changement de politique de maintenance est une décision importante prise de façon éclairée après avoir analysé la performance de la fonction maintenance sur le plan technico-économique et après s'être fixé de nouveaux défis d'optimisation. De même, nous avons expliqué comment le changement de politique de maintenance doit être une décision conjointe entre maintenance et production avec l'approbation de la haute direction. En outre, le service de maintenance qui sans doute comprend mieux le bien-fondé de ce changement de politique se doit de le prouver à la production et à la haute direction dans un rapport client-fournisseur. Cette relation de client-fournisseur est d'ailleurs de même nature entre un fournisseur de sous-traitance ou d'impartition de service vis-à-vis de la fonction de maintenance interne à l'entreprise. Dans une telle démarche, il est nécessaire de définir un référentiel technico-économique fait d'indicateurs systématiques d'évaluation, de suivi, de contrôle et d'amélioration. En réalité ces indicateurs sont des informations définies, en lien avec les fonctionnalités de gestion de la maintenance, dont le but est d'en observer périodiquement les évolutions au regard des objectifs prédéfinis (AFNOR, 1995).

Puisque la politique et les objectifs varient d'une entreprise à une autre, il serait erroné de dire qu'une liste d'un certain nombre d'indicateurs est exhaustive ou encore figée ou même miracle. Cependant, il est nécessaire de définir des indicateurs de base pouvant servir de point de départ dans un partenariat client-fournisseur et qui peuvent être améliorés dans le temps.

La norme AFNOR (1995) a dressé une liste d'indicateurs pertinents couvrant les aspects technico-économiques de la fonction maintenance au sein de l'entreprise. Ces indicateurs abordent les coûts en maintenance, les coûts de défaillances, les coûts d'indisponibilité, la gestion des ressources humaines et matérielles en maintenance, les temps en maintenance, le chiffre d'affaires relatif à la production. En somme, ce sont des indicateurs pertinents de base pour la gestion de maintenance de toute entreprise.

Corrélativement, l'Association des manufacturiers et exportateurs du Québec (MEQ) a proposé une liste de 58 indicateurs généraux pour améliorer la performance des entreprises. Au sein de ces 58 indicateurs se trouvent des indicateurs de maintenance fort-bien intéressants rejoignant certains indicateurs de la norme AFNOR (1995) et pouvant également servir de base pour toute entreprise. Certains aspects y ont été développés tels que, par exemple, des indicateurs pour évaluer et suivre certaines fonctionnalités de la GMAO ou encore des indicateurs permettant de gérer l'ordonnancement des travaux ou l'organisation du travail et de la main d'œuvre. Les indicateurs dérivés de la GMAO sont importants car les GMAO regorge des informations utiles de gestion de maintenance pouvant éclairer les services de maintenance dans les prises de décisions (Manufacturiers et Exportateurs du Québec, 2007).

Le site éducationnel par internet Asset Insights a pour sa part listé un certain nombre d'indicateurs globaux pour les actifs physiques dans le domaine de la construction et du génie civil. Mais ces indicateurs sont transposables à toute sorte d'entreprise. Les indicateurs énumérés sont par exemple économiques : indice financier d'état de l'actif, l'indice de rallongement de la vie utile de l'actif, l'indice de la santé financière de l'actif ou encore

l'indice de l'évolution des coûts du cycle de vie de l'actif dans le temps. Ces indicateurs sont aussi techniques et touchent par exemple : l'indice d'état de l'actif, l'indice de fonctionnalité de l'actif, l'indice de criticité en utilisation de l'actif, l'indice de taux d'utilisation de l'actif, l'indice de gestion des bons de travail pour les tâches de maintenance sur l'actif.

Au total, nous nous sommes proposés de regrouper les différents indicateurs pertinents suivant une matrice (ou tableau) en considérant en colonne les différents concepts clés de gestion des actifs physiques qui sont : la santé-sécurité au travail et la protection de l'environnement, la GMAO, la gestion des tâches de maintenance, la gestion des pièces de rechange et la logistique, l'utilisation des actifs, l'organisation du travail et de la main d'œuvre, la gestion des travaux, le rapport entre productivité et maintenance, la conception et le design et le cycle de vie de l'actif. Ensuite, les indicateurs sélectionnés ont été distribués suivant quatre facteurs : la sécurité, les coûts, le temps et les ressources. Le Tableau A II-1 en annexe II représente cette matrice. Tous ces indicateurs sont liés entre eux. En parcourant ce tableau, certains indicateurs paraissent redondants d'un concept à un autre. Mais ils ne peuvent être considérés comme étant superflus car l'interprétation d'indicateurs quand bien identiques ont des significations différentes d'un concept à un autre. Cette différence de significations peut même dépasser le cadre intrinsèque de l'entreprise et décrire des interprétations différentes sur deux sites différents d'une même entreprise ou encore d'une entreprise à une autre.

Mais, compte tenu de cette redondance et afin de réduire cette liste pour des fins pratiques, nous avons regroupé certains indicateurs à prioriser comme suit. Rappelons que ces indicateurs sont inspirés de : AFNOR (1995), de Manufacturiers et Exportateurs du Québec (2007) et de Bo et al. (2012).

En dehors des neuf indicateurs ci-dessous s'ajoute l'indice de criticité défini plus haut au début du présent chapitre.

Notons également qu'il est nécessaire de se reporter au tableau Excel-référentiel multicritère technico-économique pour avoir la signification de chaque indicateur cité ci-dessous. Et aussi, que ces indicateurs doivent être utilisés au besoin suivant le domaine ou le contexte d'application et les objectifs visés.

i1- Santé et sécurité au travail- Protection de l'environnement (à l'arrêt comme en utilisation des actifs)

$$\frac{\text{Nombre d'accidents avec arrêts}}{\text{Nombre d'heures travaillées}} \times 10^6 \quad (3.2)$$

$$\frac{\text{Primes d'assurance (en devise locale)}}{\text{Montant de masse salariale assurable}} \quad (3.3)$$

i2- Disponibilité des actifs pour une meilleure productivité de qualité tout au long du cycle de vie de l'actif

$$\frac{\text{coût de maintenance} + \text{coûts d'indisponibilité}}{\text{chiffre d'affaires relatif à la production}} \quad (3.4)$$

$$\frac{\text{Temps propre d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps effectif d'indisponibilité}} \quad (3.5)$$

$$\frac{\text{Temps de bon fonctionnement}}{\text{Temps effectif de disponibilité}} \quad (3.6)$$

i3- Optimisation de la gestion des stocks (et de la logistique)

$$\frac{\text{Valeur du stock} - \text{maintenance d'un actif}}{\text{Valeur de l'actif à maintenir}} \quad (3.7)$$

$$\frac{\text{Valeur des achats annuels pour remplacer les articles disponibles en magasin}}{\text{Valeur des stocks en magasin}} \quad (3.8)$$

i4- Processus de maintenance et Organisation du travail

$$\frac{\text{Temps propre d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps effectif d'indisponibilité}} \quad (3.9)$$

$$\frac{\text{Temps de préparation de maintenance}}{\text{Temps actif de maintenance}} \quad (3.10)$$

i5- Gestion des documents techniques

$$\frac{\text{coût des documents techniques}}{\text{coûts de maintenance}} \quad (3.11)$$

$$\frac{\text{Temps de traitement des documents techniques}}{\text{Temps requis en maintenance}} \quad (3.12)$$

i6- Gestion des tâches de maintenance (élimination par exemple des dommages collatéraux) et ordonnancement (par une meilleure gestion des bons de travail)

$$\frac{\sum \text{des temps de bon fonctionnement}}{\text{Nombre de défaillance}} \quad (3.13)$$

$$\frac{\text{Heures travaillées en maintenance corrective}}{\text{Total des heures annuelles travaillées par la maintenance}} \quad (3.14)$$

i7- Synchronisation temporelle des données de GMAO avec celles de la maintenance prédictive infonuagique

$$\frac{\text{Temps de réalisation des procédures techniques gérés par la GMAO}}{\text{Temps d'indisponibilité pour la maintenance}} \quad (3.15)$$

$$\frac{\text{Temps de réalisation des tâches de maintenance sur Bon de travail}}{\text{Temps d'indisponibilité pour maintenance}} \quad (3.16)$$

i8- Intégration complète de l'âge et de comparaison d'actif-à-actif dans les décisions de maintenance

$$\frac{\sum \text{des âges moyens des actifs d'un parc homogène}}{\text{Nombre d'actifs du parc}} \quad (3.17)$$

$$\frac{\text{Durée de vie opérationnelle}}{\text{Durée de vie conceptuelle}} \quad (3.18)$$

i9- Ressources investies versus ressources générées par chaque actif depuis sa conception jusqu'à sa disposition

$$\frac{\text{Valeur actuelle de l'actif}}{\text{Valeur à neuf de l. actif}} \quad (3.19)$$

$$\frac{\text{Investissement courant (sur une période de temps } t \text{) de l'actif}}{\text{Investissement estimé sur une période extrapolée (investissement du cycle de vie) de l'actif}} \quad (3.20)$$

i10- Utilisation du retour d'expérience pour améliorer la conception et le design

$$\frac{\text{Nombre d'accidents réduit par l'amélioration de la conception}}{\text{Nombre moyen d'accidents du retour d'expérience}} \quad (3.21)$$

$$\frac{\text{Temps d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps de fonctionnement ou quantité de production}} \quad (3.22)$$

Au total, plusieurs outils technico-économiques sont nécessaires pour permettre aux concepteurs de solutions offrant la maintenance prédictive infonuagique de sélectionner leurs prospects et d'implanter par la suite une maintenance prédictive infonuagique sur le composant ou le module critique d'un actif critique. Une évaluation régulière de la performance de la maintenance devra être initiée après changement de politique afin de confirmer la valeur ajoutée estimée au début du projet et d'apporter des améliorations continues au besoin.

Résumé du troisième chapitre

Dans ce chapitre 3, nous avons examiné et analysé tous les éléments pouvant entrer en ligne de compte dans l'élaboration de la trousse technico-économique afin de faciliter l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique.

Tout d'abord, puisque l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique ne doit pas être l'apanage de toute sorte d'entreprise, nous avons examiné les critères de qualification d'une entreprise à l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique. Parmi ces critères, nous pouvons par exemple citer la maturité de l'entreprise point de vue de gestion de la fonction maintenance sur les plans techniques et économiques, ou encore sur le plan de la gestion des ressources humaines en maintenance, la gestion de la logistique et le stock des pièces de rechange, la gestion des technologies de l'information etc. De même, étant entendu que l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique ne doit se faire que pour les actifs critiques, nous avons examiné les niveaux de criticité des actifs devant bénéficier d'une telle politique de maintenance évoluée. Ainsi, les criticités point de vue de la production, de la maintenance, de l'âge de l'actif ainsi que du point de vue sécurité et environnement ont été examinés. En outre, nous avons proposé une méthode de classification hiérarchique du niveau de criticité des actifs ou de leurs composants dans le but de définir l'ordre de priorisation de l'application de la maintenance prédictive infonuagique sur un parc d'actifs ou encore sur un ensemble de composants ou de modules constitutifs de chaque actif critique. Le principe dans ce premier volet dans la conception de la trousse technico-économique a été d'appliquer la maintenance prédictive infonuagique à un composant ou module critique d'un actif critique appartenant au parc d'actifs d'une entreprise éligible ou qualifiable à l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique.

Par ailleurs, le choix d'une politique de maintenance est très complexe. Alors, nous avons donné une idée sur le chemin décisionnel qui peut conduire à opter pour une politique de maintenance prédictive infonuagique pour les composants ou les modules d'un actif critique en nous basant sur deux fonctions importantes caractéristiques des actifs à savoir : l'âge et le taux de défaillance.

Dans l'élaboration de la trousse technico-économique, nous avons analysé les aspects technico-économiques ainsi que l'aspect sécurité et environnemental de la fonction maintenance au sein de l'entreprise. Cela nous a conduits à décrire la gestion technique des parcs d'équipements, les processus de maintenance en mettant l'accent sur les fonctions techniques de la fonction maintenance dont l'efficacité est dictée par un inventaire fiable et exhaustif. Sur le plan économique, nous avons examiné les attentes économiques de la fonction maintenance. Évidemment, si les aspects technico-économiques semblent à première vue la priorité des entreprises, la prospérité de ces dernières n'est possible que si l'aspect sécurité et environnement sont pris en compte rigoureusement dans le respect strict des normes et des réglementations qui de nos jours, ont une tolérance zéro sur ce sujet. Ainsi, nous avons examiné le rôle et les obligations de la fonction maintenance dans le respect strict de la sécurité et l'environnement durant tout le cycle de vie des actifs. La nécessité d'établir un rapport entre les coûts et les profits obtenus dans les investissements faits en maintenance nous a conduit à analyser les rapports coût-efficacité et coût-avantages, c'est-à-dire, le rapport coût-performance de la fonction maintenance.

Enfin, nous avons conçu et listé un référentiel multicritère technico-économique constitué de certains indicateurs de maintenance pouvant servir d'évaluer la performance de la fonction maintenance, de la suivre et de l'améliorer au besoin au cours du temps. Ce référentiel est fait d'une matrice (sur feuille Excel) ayant en lignes des critères de santé et sécurité au travail, le temps, les coûts et les ressources; et en colonnes les domaines ou les secteurs de la gestion des actifs sur lesquels la fonction maintenance a un impact.

CHAPITRE 4

ÉVALUATION DE LA TROUSSE D'OPPORTUNITÉS TECHNICO-ÉCONOMIQUES DE L'ADOPTION DE LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE INFONAGIQUE

Tout au long des trois précédents chapitres, nous avons parcouru la littérature en faisant tout d'abord une synthèse de la gestion des actifs physiques suivant les recommandations du PAS55. Ensuite et toujours dans la revue de littérature, nous avons exploré comment l'évolution technologique sans cesse croissante entraîne la conception des actifs plus intelligents exigeant de ce fait un nouveau concept de maintenance. Ce nouveau concept de maintenance bénéficie également des outils évolués de l'essor technologique et crée des opportunités technico-économiques pour l'amélioration des systèmes de gestions des actifs en particulier la Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO). Désignée par la maintenance prédictive infonuagique, cette nouvelle forme de politique de maintenance conserve les divers avantages de la maintenance prédictive traditionnelle pour la gestion des actifs. En outre, elle permet de résoudre les insuffisances de la maintenance prédictive traditionnelle ainsi que sa synchronisation avec les progiciels de GMAO dont elle enrichit les fonctionnalités.

Mais ce nouveau concept de maintenance évoluée est loin d'être adoptée par les gestionnaires d'entreprises. Ainsi, nous avons examiné les outils nécessaires à la compréhension des enjeux de cette nouvelle politique de maintenance et pouvant faciliter son adoption par les entreprises. Nous avons donc proposé une démarche à suivre dans l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique qui pourra éclairer toute entreprise dans son changement de politique de maintenance. Un référentiel multicritère technico-économique composé d'indicateurs technico-économiques de maintenance a été donc conçu pour aider à évaluer, à suivre et améliorer les performances de la fonction maintenance au sein des entreprises.

Dans ce dernier chapitre, nous allons évaluer cette trousse d'opportunités technico-économiques conçues sur plusieurs plans :

- La compréhension des enjeux de l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique;
- Analyse des outils d'explication et d'évaluation des avantages de l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique;
- Adéquation entre problème d'adoption et toute solution offrant la maintenance prédictive infonuagique;
- Justification d'implantation de la maintenance prédictive infonuagique.

Ensuite, nous allons récapituler dans une grille d'évaluation les scores obtenus dans les questionnements ci-dessus. Précisons que ces scores obtenus proviennent d'une évaluation de la trousse qui a été conçue, par un panel d'experts sur l'amélioration de la qualité de la promotion vente de leur solution novatrice.

Enfin nous ferons une étude de marché pour explorer les clients potentiels pouvant bénéficier de l'adoption de cette nouvelle forme de politique de maintenance. Et nous proposerons les techniques de vente afin d'aider toute entreprise voulant vendre une solution s'inscrivant dans cette optique, à mieux convaincre ses clients. Nous clôturerons ce mémoire par une identification des limites de notre démarche et les recherches futures possibles.

4.1 Compréhension des enjeux de l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique pour les entreprises.

Identifiée comme une nouvelle forme de maintenance résultant du développement technologique dans la conception des actifs physiques, la maintenance prédictive infonuagique utilise des technologies assez complexes malgré ses avantages démontrés pour les entreprises.

Le choix d'une bonne politique de maintenance à adopter pour un parc d'actifs, en soi est un processus assez complexe et sa gestion reste confrontée à une double contrainte : d'un côté, celle qui permet d'optimiser et de pérenniser la performance des actifs sous maintenance; de l'autre, celle de minimiser les ressources consenties pour la gestion de la maintenance. Tout semble donc focaliser sur la fonction maintenance au sein de l'entreprise dont l'efficacité et

l'efficacité sont jugées par la minimisation des coûts et des temps en maintenance, l'accroissement de la production, la minimisation des accidents de travail, la minimisation des effets de pollution de l'environnement. Dans ce contexte, la fonction maintenance a peu de choix dans l'adoption d'une maintenance performante. Paradoxalement, elle doit définir une politique dont elle est convaincue, et s'évertuer à démontrer son choix face à la haute direction qui ignore la maintenance mais sans laquelle la fonction maintenance serait désarmée. La démarche consiste donc à ce que la fonction maintenance comprenne de façon approfondie et maîtrise la composition de son parc matériel ainsi que sa nouvelle politique de maintenance en vue; mais aussi comprendre les attentes de la haute direction afin de parler un langage technico-économique de cette dernière. Des points développés dans ce mémoire dans les chapitres 1,2 et 3, nous allons passer en revue les points essentiels définissant les enjeux technico-économiques de l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique.

Dans l'approche globale de la prospérité dans un environnement dans lequel toute entreprise évolue, le respect du concept PESTE regroupant les aspects : Politique, Économique, Social, Technologique, Écologique ou Environnement, est de rigueur dans une gestion intégrée.(William J. Stevenson., Claudio Benedetti. et Youssef, 2012). Ce concept PESTE reste cependant extrinsèque à la gestion des entreprises quand bien même son respect a un impact notable sur la configuration et le fonctionnement intrinsèque de l'entreprise. De façon analogue, nous pouvons transposer ce concept PESTE dans le contexte de gestion interne de l'entreprise en désignant par : P, la Politique intérieure de l'entreprise définie par la haute direction; E, les considérations économiques de l'entreprise; S, l'aspect social ou encore l'aspect des ressources humaines; T, l'aspect technique ou technologique et E, l'aspect sécurité et environnement.

La fonction maintenance est une composante au cœur de la gestion intégrée de l'entreprise. Malgré l'évolution sans cesse croissante dans la conception des actifs physiques, la politique qui régit la maintenance doit permettre la performance globale de l'entreprise dans le respect du contexte PESTE intra et extra entreprise. Ceci traduit l'importance capitale que revêt le

bon choix d'une politique de maintenance. Plus particulièrement, lorsqu'une entreprise a l'opportunité de jouir d'une politique de maintenance, elle ne devrait pas hésiter un instant pour l'adopter.

L'essor de la maintenance prédictive infonuagique présente des avantages incontestables sur la gestion des actifs physiques que nous avons explorés tout au long de ce mémoire. Ces différents avantages qui englobent la maintenance prédictive traditionnelle tels que l'optimisation de la production, la contribution à l'amélioration de la conception des actifs, l'optimisation de la performance opérationnelle, de la logistique et de la maintenance et d'ailleurs sur le cycle de vie de l'actif en général.

Le jumelage entre l'infonuagique, un outil puissant révolutionnaire résultat de l'évolution technologique des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication), et la maintenance prédictive traditionnelle offre encore une immense richesse d'opportunités technico-économiques pour l'optimisation d'une gestion proactive des actifs et logiquement l'enrichissement des fonctionnalités de tout logiciel de gestion des actifs tels que la GMAO. Certaines solutions novatrices ont été conçues (telles que la solution //m4 de Matricis informatique) permet de promouvoir cette nouvelle forme de maintenance.

Mais, malgré toutes ces opportunités technico-économiques de l'adoption d'une telle solution novatrice pour l'optimisation de la gestion des actifs, plusieurs entreprises peinent à l'adopter. Différentes raisons peuvent expliquer cette réticence de la plupart des entreprises à opter pour la maintenance prédictive infonuagique au nombre desquels nous pouvons citer :

- Le manque de connaissance adéquate des principes et des systèmes de gestion des actifs physiques dont une bonne référence est celle recommandée par le PAS 55;
- Le manque de connaissance en gestion de la fonction maintenance au sein de l'entreprise;

- Le manque de connaissance approfondie de la maintenance prédictive infonuagique, la raison de sa conception et son but par rapport aux autres formes de maintenance, ses technologies et ses différentes applications ainsi que son impact sur toutes les composantes la gestion des actifs;
- La non perception de l'impact de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion de la maintenance assistée par ordinateur;
- L'absence de référentiel fait d'outils d'évaluation, de suivi et d'amélioration des performances de la fonction maintenance au sein de l'entreprise;
- L'absence d'outils technico-économiques pouvant permettre au service maintenance en collaboration avec la production d'être convaincu dans sa démarche de changement de politique de maintenance et d'en pouvoir convaincre la haute direction d'investir pour un tel changement de politique;
- La non connaissance de la démarche globale d'adoption de la maintenance prédictive infonuagique;
- Les profonds changements sur le plan des ressources humaines (changement d'habitudes, organisation du travail, etc.) que peut apporter un changement de politique de maintenance au sein de l'entreprise.
- Enfin comprendre que l'intégration de tous ces points ci-dessus cités dans une conviction qu'adopter la maintenance prédictive infonuagique représente une véritable opportunité technico-économique pour l'optimisation de la performance globale de l'entreprise.

Dès lors, une recherche de solution dans l'analyse de tous les points ci-dessus, pourront permettre non seulement d'aider les services de maintenance au sein des entreprises à être convaincus des avantages d'adoption de la maintenance prédictive infonuagique mais aussi

de permettre à tout concepteur d'une solution logiciel offrant la maintenance prédictive infonuagique de mieux promouvoir leur produit auprès des entreprises. Le marché potentiel est énorme mais des techniques de vente nécessaires.

En attendant d'aborder l'étude de marché potentiel et quelques techniques de vente, nous allons analyser les outils d'explication et d'évaluation des avantages de l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique.

4.2 Analyse des outils d'explication et d'évaluation des avantages de l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique

Dans le sous chapitre précédent, nous avons examiné les enjeux de l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique et nous avons cité les raisons qui justifient selon nous la réticence de la plupart des entreprises à l'heure actuelle à ne pas opter pour son adoption.

Nous avons proposé une démarche et des outils (trousse) pour expliquer et évaluer les avantages de l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique. Dans le présent sous chapitre, nous nous proposons d'analyser ces outils dans leur pertinence à éclairer les gestionnaires d'entreprises à mieux comprendre le bien-fondé de cette nouvelle politique de maintenance intelligente.

L'analyse de ces outils nous conduit aux points suivants :

- La démarche de gestion des actifs recommandée par le PAS 55 a consisté à montrer de façon succincte, à gérer les actifs suivant une vue holistique en intégrant toutes les composantes de gestion de l'entreprise et englobant l'économie, le social, la politique, la technologie et l'environnement. Certes, il n'existe pas de standard en gestion des actifs, mais suivre les recommandations du PAS 55 est comme le point de départ dans la gestion des actifs physiques d'une entreprise. En d'autres termes, en adoptant les recommandations du PAS55, toute entreprise fait un pas vers le succès d'une gestion performante pérennisée. Plus particulièrement, la gestion de la maintenance qui est au cœur de la gestion des actifs en bénéficierait.

- Lorsque nous parlons de gestion d'actifs physiques, certains logiciels ont pour but d'aider à mieux faire atteindre cet objectif. La GMAO en est un exemple. Les fonctionnalités des GMAO couvrent toutes les composantes de la gestion de la fonction maintenance au sein de l'entreprise. Mais la pléthore de données à traiter entraîne des coûts d'extension de matériels nécessaires pour couvrir le grand volume de données de gestion de maintenance. Aussi, en intégrant la maintenance prédictive aux progiciels de GMAO, il ressort une incohérence temporelle résolue par l'infonuagique. La force des GMAO réside dans l'ordonnancement des tâches mais, ils font piètre figure en matière de surveillance en temps réel de l'état des actifs. C'est pourquoi en la combinant avec la maintenance prédictive qui elle surveille en temps réel l'état des actifs mais ne peut faire de planification, on obtient un outil très puissant au service de la gestion des actifs. Mais un problème se pose aussi bien pour les GMAO et la maintenance prédictive, ce sont les données multi sites qui affectent la performance des GMAO et la non prise en considération dans la démarche de maintenance prédictive de la comparaison des données d'actifs de même type.

En analysant les avantages et les inconvénients de la GMAO et de la maintenance prédictive, on comprend mieux le lien de complémentarité entre ces deux répertoires importants de l'entreprise mais aussi l'apport de l'infonuagique qui rend encore plus puissante leur combinaison pour l'optimisation de la gestion des actifs.

- La description des technologies de maintenance prédictive et leur différentes applications met en exergue les principes de chaque technologie de maintenance prédictive ainsi que les modules des actifs sur lesquels elles sont applicables. Cette description permet aussi de comprendre l'aspect multidimensionnel de certaines technologies dont la combinaison permet de raffiner le diagnostic et la prédiction des défaillances. Si leur implantation et la maintenance des infrastructures de telles technologies sont assez dispendieuses, le recours à l'infonuagique permet de donner plus d'importance à cette forme de maintenance évoluée.
- Du fait de la complexité et des coûts associés à l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique, seuls les actifs critiques devront être visés. La démarche de recherche

d'actifs critiques permet de sélectionner les actifs dont les modules ou composants critiques vont bénéficier de la maintenance prédictive infonuagique. Ces actifs critiques doivent faire partie du parc d'actifs d'une entreprise elle-même retenue comme critique suivant des niveaux de criticité bien définis. L'arbre décisionnel décrivant le chemin de choix d'une maintenance prédictive infonuagique permet d'examiner si le module critique d'un actif critique peut connaître une application de la maintenance prédictive infonuagique.

- L'un des buts essentiels d'une solution offrant la possibilité d'adoption de la maintenance prédictive infonuagique est d'agir sur les processus de maintenance en exploitant les données de surveillance des états des actifs. Ainsi, la description des processus de maintenance permet de mieux comprendre les processus initiés par les fonctionnalités de la maintenance prédictive infonuagique. Toute fonction de maintenance au sein de l'entreprise doit avoir un processus de maintenance bien défini. Ainsi, toute action d'amélioration, toute valeur ajoutée pourra être quantifiée en termes de temps, de coûts, de ressources et de la santé et sécurité. Ces valeurs ajoutées sont quantifiées par des indicateurs de maintenance définies au préalable.

- Pour évaluer la performance de la fonction maintenance, suivre son évolution dans le temps et quantifier sa performance après changement de la politique de maintenance, il est nécessaire de se référer à des indicateurs de maintenance prédéfinis. Ce référentiel est particulièrement composé des indicateurs technico-économiques qui décomposent la gestion technique et la gestion économique de la fonction maintenance sur l'impact qu'ont la sécurité, les coûts, les temps (en maintenance) et les ressources sur les différentes fonctions de gestion de l'entreprise telles que : la production, la santé et sécurité au travail, la logistique, l'organisation du travail ou de la main d'œuvre, la gestion des tâches de maintenance, les GMAO, le concept et le design etc. Ces indicateurs doivent être limités et leurs interprétations devront faire l'unanimité au sein des services de l'entreprise. Ce référentiel représente donc "la jauge" commune à toutes les fonctions de l'entreprise mais surtout permet au service maintenance de quantifier sa

performance et de démontrer à la haute direction l'impact de son changement de politique de maintenance sur la production ainsi que sur toute la gestion générale des actifs de l'entreprise. Mieux, c'est un outil essentiel permettant à tout vendeur d'une solution offrant la maintenance prédictive infonuagique, qui est vu comme un prestataire de service externe à l'entreprise, de prouver les retombées de sa solution novatrice dans l'optimisation de la performance générale de l'entreprise.

Cependant, il reste important de souligner que la mesure par des indicateurs de référence ne peut être effective que si la fonction maintenance est bien organisée au préalable et dispose des données telles que les temps de maintenance, les coûts et les budgets de maintenance, un processus bien défini. En un mot, la fonction maintenance doit démontrer une certaine maturité qui entre d'ailleurs en ligne de compte dans la qualification de l'entreprise dans le but de bénéficier d'une politique de maintenance prédictive infonuagique.

Dans les lignes à suivre nous allons examiner si les outils proposés pour expliquer et évaluer les avantages de l'adoption d'une maintenance prédictive infonuagique concordent avec les problèmes que nous avons supposés être la cause de la non- vulgarisation de la non-adoption de la maintenance prédictive infonuagique par les entreprises.

4.3 Adéquation entre problème d'adoption et toute solution offrant la maintenance prédictive infonuagique

Un peu plus haut dans ce chapitre nous avons exploré les problèmes qui amènent les gestionnaires d'entreprise à ne pas opter pour la maintenance prédictive infonuagique. Nous avons également exploré et expliqué dans le sous chapitre précédent les outils pouvant aider ces gestionnaires à comprendre et à les éclairer dans leur décision d'adoption de la maintenance prédictive infonuagique.

Dans ce sous chapitre, nous allons examiner l'adéquation entre problèmes évoqués et la trousse d'outils conçue pour démontrer les opportunités technico-économiques qui se présentent eux dans l'adoption d'une telle solution novatrice.

Les différentes correspondances se présentent comme suit :

- La synthèse des bonnes pratiques de gestion des actifs selon le PAS 55 est pour combler le manque de connaissance adéquate des principes et des systèmes de gestion des actifs physiques. Ainsi, les entrepreneurs ont l'occasion de mieux comprendre la démarche globale en matière de gestion des actifs physiques, d'analyser leur système de gestion actuel, de ressortir les défauts afin d'apporter des améliorations.

- La bonne définition de la politique, la stratégie et les objectifs ainsi que la description des missions techniques et économiques de la fonction maintenance au sein des entreprises, sont des outils permettant de comprendre ce que la haute direction attend en investissant en maintenance. Ces outils permettent aussi au service maintenance de mieux évaluer sa performance afin d'en apporter des améliorations ou afin de changer sa politique de maintenance par une autre jugée plus adéquate. Ainsi, le manque de connaissance en gestion de la fonction maintenance au sein de l'entreprise trouve donc des éléments d'éclaircissement. Mieux, la détermination d'indicateurs de performance permettant d'évaluer la fonction maintenance permet d'avoir des indices technico-économiques pour faire l'état des lieux et pour mieux communiquer avec la haute direction. Sur le plan de l'organisation de la fonction maintenance, la description des processus de maintenance, la décomposition en études, ordonnancement et réalisation ou encore le schéma de la gestion technique d'un parc d'équipements sont d'une grande utilité.

- L'adoption de la maintenance prédictive infonuagique ne peut se faire sans une connaissance approfondie du concept de maintenance prédictive infonuagique. C'est pourquoi nous avons expliqué la maintenance prédictive infonuagique en la comparant aux autres formes de maintenance, en décrivant ces objectifs et les différentes applications de ses technologies. C'est toujours dans cette optique que nous avons exploré les différents avantages de la maintenance prédictive infonuagique dans la gestion des actifs en général et plus particulièrement de son important rôle à enrichir les fonctionnalités de GMAO existants. D'ailleurs la récapitulation des différentes fonctionnalités des GMAO permet de voir de façon tangible l'impact de cette nouvelle

forme de maintenance sur les progiciels de GMAO. De plus, le choix d'une politique de maintenance étant un processus assez complexe, nous avons proposé une démarche pour son adoption. Elle n'est pas exhaustive certes, mais peut aider les gestionnaires à opter pour cette nouvelle forme de maintenance.

- Enfin une intégration de toutes ces notions permet d'avoir la conviction des opportunités que présentent une telle nouvelle forme de maintenance pour l'optimisation de la performance globale de l'entreprise et ainsi permettre la vulgarisation de son adoption par les entreprises.

Le tableau A IV-1 en annexe IV présente le résumé de la correspondance d'adéquation entre problèmes de la non-adoption de la maintenance prédictive infonuagique et nos propositions d'outils conçus pour y remédier.

4.4 Justification d'implantation de la maintenance prédictive infonuagique

Des approches de solutions sont explorées pour pallier les raisons qui justifieraient le fait que la plupart des entreprises tardent encore à adopter la maintenance prédictive infonuagique. Dans ces conditions, il serait donc nécessaire de répondre à la question "Pourquoi" les entreprises devraient implanter une solution offrant la maintenance prédictive infonuagique?

Cette question se pose sous deux angles :

- Il est d'abord question pour le service de maintenance de justifier à sa haute direction l'implantation d'une telle solution.
- Ensuite, il faudra que tout prestataire de service offrant toute solution conçue pour permettre l'adoption de maintenance prédictive infonuagique puisse justifier au service de maintenance et à la production l'aubaine qui se présente à eux en achetant leur produit.

Quoiqu'il advienne dans les deux cas, les arguments à utiliser demeurent les mêmes.

Les principaux arguments à énumérer pour étayer le bien-fondé de l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique sont nombreux, nous citons les 20 points suivants :

- Rester compétitif par une optimisation de la gestion des actifs physiques pour répondre aux exigences et attentes de plus en plus élevées des marchés (produire en grande quantité avec une meilleure qualité tout en respectant les normes de santé et sécurité et un budget raisonnable). En effet, le rendement de l'entreprise est en lien direct avec celui des actifs physiques critiques durant leur cycle de vie sur le plan technico-économique et sur le plan sécurité et environnemental.
- Permettre sa meilleure synchronisation avec les GMAO afin d'améliorer la gestion des actifs physiques afin de faire correspondre les temps en GMAO (temps de maintenance) et les temps en maintenance prédictive (temps réel).
- Enrichir les fonctionnalités des GMAO par entre autres, une amélioration de la planification en temps réel des tâches de maintenance et une meilleure implication de chaque employé et une flexibilité d'utilisation, une meilleure sécurisation des données de maintenance, tous facteurs de succès des implantations des GMAO. Ainsi, les GMAO deviennent plus dynamiques et proactifs et ne paraissent plus obsolètes une fois implantée.
- Éliminer les coûts dispendieux des infrastructures et toutes sortes d'insuffisances observées dans le cas d'une maintenance prédictive traditionnelle (sans info nuage) malgré la pléthore sans cesse croissante de données, par un hébergement en info nuage qui offre entre autres le caractère d'extensibilité.
- Rendre les processus de maintenance plus efficaces en les améliorant par l'utilisation des données de surveillance d'état des actifs qui confèrent un caractère proactif à la fonction maintenance.

- Mieux s'outiller pour le respect des normes et réglementations par une prédiction des défaillances, sources d'accidents opérationnels ou au cours des activités de maintenance corrective. Mais aussi, la possibilité de mieux respecter les normes de protection de l'environnement par l'utilisation des données plus précises et détaillées de surveillances des actifs décrivant leurs historiques et permettant de choisir la méthode la moins polluante pour leur mise au rebut.
- Aider à arbitrer les contentieux avec les compagnies d'assurance des actifs physiques critiques en situant les responsabilités entre les défauts de conception ou encore les défauts d'installation et d'utilisation par analyse des historiques de données de surveillance d'état des actifs.
- Prolonger la durée de vie des actifs physiques en réduisant par exemple au maximum, le nombre de défaillances, en améliorant les données et consignes opérationnelles, en adoptant une politique de maintenance selon le niveau de criticité de l'actif, en utilisant les pièces de rechange jusqu'à la fin effective de leur durée de vie au lieu de les remplacer de façon systématique.
- Optimiser la gestion des stocks de pièces de rechange en permettant un stock juste nécessaire selon les prédictions de défaillances et non selon un remplacement systématique qui engendre une immobilisation de capitaux et des coûts de logistiques et de maintenance.
- Éviter le remplacement systématique des pièces de rechange ayant encore une durée de vie utile source de gaspillage.
- Améliorer l'organisation et planification du travail par une meilleure répartition des ressources facilitée par une connaissance précise de l'ampleur et la complexité des tâches de maintenance à accomplir.

- Améliorer la santé et sécurité au travail en minimisant les accidents et la pollution de l'environnement aussi bien en utilisation qu'à l'arrêt des actifs pour des activités de maintenance et ce tout au long du cycle de vie de l'actif.
- Améliorer la gestion des tâches de maintenance par un meilleur ordonnancement des tâches de maintenance impliquant un gain de temps et en coûts de maintenance.
- Améliorer la maintenance corrective par élimination des dommages collatéraux au cours des interventions réactives.
- Améliorer le design de l'actif ou de ses composants par une meilleure utilisation des retours d'expérience indiquant les maillons faibles des modules des actifs à renforcer.
- Optimiser la gestion de la maintenance par une meilleure collaboration, une centralisation, un meilleur partage des informations de maintenance et opérationnelles qui procurent un dynamisme au personnel où désormais chaque employé se sent impliqué dans la prospérité de l'entreprise.
- Adopter un remplacement économique, c'est-à-dire, un remplacement juste-à-temps et juste nécessaire des actifs ou de leurs composants faisant économiser d'énormes coûts autrefois dus aux arrêts de production.
- L'augmentation de la disponibilité (la moyenne de temps de bon fonctionnement) permet d'avoir une productivité accrue et de qualité et un programme de production plus maîtrisé.
- Bénéficier d'une offre de solution novatrice permettant l'implantation d'une maintenance prédictive infonuagique payable à l'utilisation tel le Saas (Software as a service) sans contrainte majeure et permettant de jauger les performances des actifs et la valeur ajoutée apportées par le changement de politique et ce, à des périodicités bien définies.

- Augmenter la performance globale de l'entreprise par un suivi d'indicateurs clés décrivant la santé financière de l'entreprise et donnant la possibilité d'agir sur les maillons faibles de l'entreprise et de pérenniser un haut niveau de compétitivité.

4.5 Quelques techniques de vente pour faciliter la vente d'une solution offrant une maintenance prédictive infonuagique

Concevoir un produit ou un service en soi est louable mais à quoi serviront-ils s'ils ne peuvent permettre de générer des profits gratifiants pour le concepteur. Le but ultime pour tout concepteur est de faire valoir son produit en échange d'un profit qu'il soit immatériel (psychologique) ou matériel (argent). Il est donc nécessaire de trouver les voies et moyens pour la commercialisation ou la vente pour tout produit ou du service conçu. Depuis l'origine des temps, plusieurs formes de commercialisations des biens ont existé (exemple du troc qui existe par absence de monnaie depuis les temps pharaoniques ou d'antiquité grecque). De nos jours, une vente du produit ou du service conçus s'impose plus que jamais dans la dynamique économique contemporaine.

Le dictionnaire LAROUSSE définit la vente comme étant une: «cession moyennant un prix convenu ». Ainsi, la vente est loin d'être un simple acte commercial et se présente comme un ensemble d'étapes d'un processus bien précis où des protagonistes (le vendeur et l'acheteur) communiquent pour que le vendeur cède son produit à l'acheteur qui l'accepte au prix convenu.

La vente a donc une philosophie décrivant diverses dimensions et impliquant par exemple la psychologie de l'acheteur mais aussi et les qualités humaines (intégrité, sincérité, confiance en soi, etc.) et professionnelles (compétence, connaissance du produit etc.) du vendeur. Avec la course effrénée à la richesse généralisée dans le monde entier, toutes les entreprises investissent pour la vente de leurs produits et services. Mais le processus de vente est assez complexe et il est important de définir des techniques qui lui sont propres.

Avoir les meilleures techniques de vente serait sans aucun doute la clé pour réaliser des ventes une bonne fois pour toutes. Mais qu'est-ce qu'un bon vendeur? Ou encore qu'est-ce qu'une vente réussie?

La solution à une vente réussie est de se demander pourquoi les gens achètent et non se demander comment vendre (Gitomer, 2013). Ainsi, dans le cas d'un concepteur de solution offrant la maintenance prédictive infonuagique voulant promouvoir son produit, la question à poser est: pourquoi les entreprises achèteront son produit et non comment faire pour vendre son produit.

En effet, en se posant la question sous cet angle, l'on serait inévitablement conduit vers des techniques et des outils intégrant les solutions des raisons qui amèneront le client à acheter telles que : *«je pense que ce produit ou service va accroître ma productivité, je vois une valeur dans le produit que j'achète, je sens que ce produit ou service convient à mes besoins, je comprends et j'achète, j'aime mon vendeur, j'ai foi en mon vendeur.»* (Gitomer, 2013). Toutes ces raisons expliquent les avantages recherchés par un acheteur. Ainsi, le produit ou le service en vente n'est pas une fin en soi, c'est la satisfaction du client qui est importante en identifiant ses attentes psychologiques (motivations, sécurité, confort etc.), ses attentes fonctionnelles (utilisation plus facile, plus durable, plus conviviales, plus adaptée etc.) ou ses attentes rationnelles (plus performant, meilleur prix, etc.) (Belz, 2010).

Quelles sont donc les techniques de vente nécessaires pour réussir une vente ou pour paraître comme le spécialiste de la vente?

Des théories abondent sur cette question car chaque champion en vente a ses méthodes ou ses techniques. Cependant, il existe un processus commun ou du moins une procédure commune pour la vente. La négociation et la réponse aux objections sont deux phases importantes qui sous-tendent les sept phases d'un processus de vente qui sont : la préparation, la présentation, la découverte des besoins, la reformulation et l'implication, la proposition et l'argumentation, les prix, la conclusion de la vente (Belz, 2010).

- *La phase de préparation* est celle au cours de laquelle tout vendeur doit identifier ses clients, le produit ou le service à commercialiser ainsi que la préparation de tout moyen ou toute stratégie à déployer au cours du processus de vente.
- *La phase de la présentation* englobe l'accueil du client et toutes les règles et formules de respect, de courtoisie, de politesse et de séduction à avoir envers le client. Ici il est important de tenir compte de la psychologie du client.
- *La découverte des besoins* permet au vendeur de s'investir par des questions stratégiques les besoins du client. La bonne compréhension de ses besoins est capitale pour savoir comment lui présenter le produit ou service à lui vendre.
- Au cours de *la reformulation et de l'implication*, le vendeur s'assure de l'utilité attendue des besoins du client et lui fait un rapprochement ou une recommandation par rapport au produit ou service qui pourrait répondre à ses besoins.
- *La proposition et l'argumentation* est la phase au cours de laquelle le vendeur présente son produit ou son service en se servant de sa connaissance du produit ainsi que des outils de vente préparés à cet effet. Son argumentation devra être bien alignée avec les besoins du client et ressortir les différents avantages que lui procure le produit ou le service en vente.
- Une fois le client convaincu de l'adéquation entre le produit ou le service qui lui est proposé et ses besoins exprimés, le vendeur peut alors lui faire des propositions de prix ou des conditions de vente. C'est *la phase des prix*. À ce niveau le client peut faire des objections qui devront être réfutées par le vendeur.
- *La conclusion de la vente* permet de finaliser la vente. Au cours de cette phase un accord entre les deux parties sur les termes de livraison, la garantie, la date de livraison et les conditions de livraison, les conditions de paiement, etc.

- *La réponse aux objections* est une phase très délicate au cours de laquelle le vendeur doit apporter des éclaircissements sur des points que le client ne comprend pas et qu'il émet sous forme d'objections. Les objections peuvent témoigner de l'intention d'acheter du client. Voici la liste de quelques objections: - *je vais y penser- je veux juste un catalogue- je dois en parler avec des amis ou mon conjoint ou mon directeur- je pense acheter le mois prochain pas tout de suite- je vais voir ailleurs- quel est votre plus bas prix ?- vous êtes trop cher- votre solution ne me semble pas bien complète- Je ne vois pas bien en quoi votre produit ou votre fera mon affaire - Je ne voudrais pas modifier ma configuration de base de mon installation- Je n'ai pas les ressources humaines nécessaires- etc.*

La liste d'objections ne peut être exhaustive et son caractère imprévisible exige du vendeur un esprit créatif, prompt et très lucide.

Aussi, il est possible de faire des suggestions d'ajout d'options ou des plans d'extension de durée de garantie par exemple, une fois le client a donné son accord pour l'achat.

En somme, toutes ces phases constituent un ensemble de gestion de négociation entre le vendeur et l'acheteur.

Tom Hopkins recommande cinq règles à suivre pour être efficace dans la vente qui sont : la prospection, établir les contacts de façon professionnelle, choisir l'interlocuteur, contrer les objections et conclure la vente (Hopkins, 1987).

En dehors de la prospection qui consiste à rechercher des clients potentiels pour un produit ou un service et d'élargir sa clientèle ou de la consolider, les autres étapes s'intègrent très bien dans les phases de vente citées ci-dessus. Notons que c'est au cours de la prospection que divers moyens de marketing sont déployés. Il existe plusieurs techniques de prospection dont entre autres : les conférences, le télémarketing, le site internet, les réseaux sociaux, les appels téléphoniques, les messages textes par les téléphones mobiles. Faire une bonne prospection permet d'avoir des informations utiles sur les prospects.

Enfin, une fois la vente conclue, il est nécessaire de faire un suivi de la satisfaction de la clientèle et de tirer conclusion de ce qui a amené le client à acheter.

4.6 Étude du Marché cible pouvant bénéficier de la maintenance prédictive infonuagique

Dans la démarche des techniques de vente ainsi que des critères pouvant permettre une vente réussie, il est important d'avoir le bon produit au bon prix avec un bon message au bon moment et au bon endroit, mais surtout de cibler le bon client. Il ne sert à rien de s'évertuer à étaler son expertise en vente face à un auditoire peu intéressé par le produit à promouvoir. Il est donc nécessaire de cibler le marché au sein duquel pourra être ressorti les clients potentiels. Le but de l'étude du marché est de définir à partir du marché global, le marché pouvant être intéressé par le produit ou le service commercialisé, c'est-à-dire, les opportunités de vente mais aussi les menaces pouvant compromettre l'extension de la clientèle.

4.6.1 Les concepts utiles de l'étude du marché

De façon schématique, l'étude du marché se présente sous de quatre concepts clés qui sont : les fournisseurs, l'offre ou la concurrence, la demande ou les clients potentiels, la réglementation et l'environnement global (Groupe Creatests, 2014). Le schéma suivant montre le lien entre ces différents concepts.

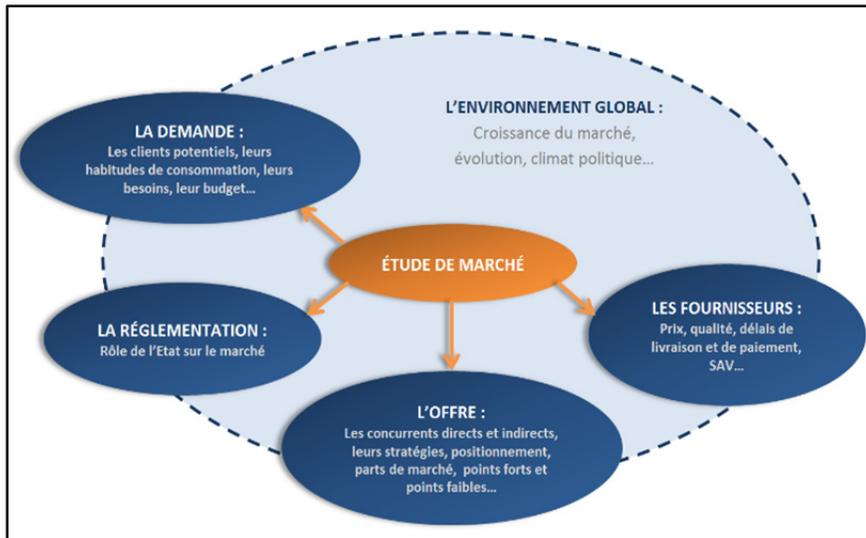


Figure 4.1 Schéma des concepts d'une étude de marché
Tirée de <http://www.creatests.com/>,
(visité le 19 Avril 2014)

- *La demande ou les clients potentiels :* Identifier les clients potentiels qui pourront être intéressés par le produit ou le service à vendre. Ces clients potentiels représentent les opportunités de vente pour le vendeur.
- *L'offre ou les concurrents :* C'est l'identification des concurrents directs ou indirects présents dans le marché étudié et la détermination des caractéristiques de leur produit, leurs stratégies de vente, leur part du marché etc. La concurrence directe est établie entre deux entreprises pouvant offrir à une clientèle considérée des produits ou des services semblables. Tandis que deux entreprises offrant des produits et services non similaires mais permettant d'atteindre les mêmes objectifs sont considérées comme des concurrentes indirectes. Il est important de souligner la relativité du concept de concurrence directe et concurrence indirecte. Ces concurrents directs ou indirects représentent des menaces pouvant compromettre les ventes du vendeur de l'entreprise réalisant l'étude du marché.

- *Les fournisseurs* : Ce sont les entreprises pouvant fournir des produits ou du service pour la commercialisation du produit en vente. La détermination des conditions de vente des fournisseurs peut influencer les prix du produit ou du service à vendre. Ces fournisseurs peuvent être sollicités au cours du marketing du produit, au cours de sa vente, de son installation ou de son service après-vente.
- *Les lois et les réglementations* : Dans l'étude du marché, il est important de déterminer les normes, les lois et réglementations qui régissent le produit ou le service à commercialiser.
- *L'environnement global* : Il s'agit de l'environnement PESTE comme nous l'avons défini un peu plus haut dans ce chapitre.

Par ailleurs, les études de marché sont des projets qui représentent de nos jours des outils de base pour l'établissement ou l'affichage de stratégies d'affaires mais sont loin d'être confinés au domaine de marketing et sont aussi utilisés dans le domaine de la recherche. (Fragnière et al., 2013).

C'est pourquoi Fragnière et al. (2013) ont suggéré le processus de l'étude de vente en six étapes principales suivant le schéma ci-dessous et en intégrant dans la collecte et l'analyse des données, le concept de l'étude qualitative et de l'étude quantitative.

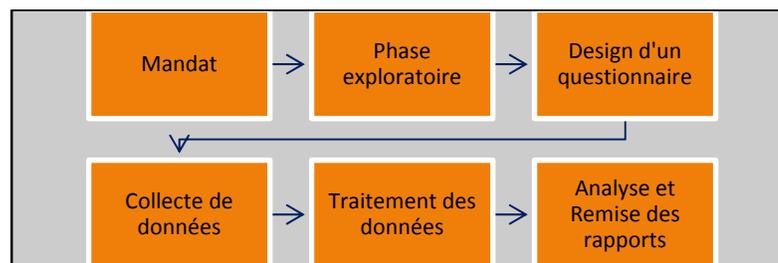


Figure 4.2 Les six étapes de l'étude de marché
Adaptée de (Fragnière et al. (2013), p.24)

Description succincte du schéma

- L'étude de marché commence par *un mandat* qui spécifie les entendements de base du projet, la mission, les objectifs et les moyens à déployer pour y arriver.
- *La phase exploratoire* consiste à se documenter par le biais des articles, des livres, l'internet, la consultation d'experts, les fiches produit, les journaux, les magazines, etc. afin de mieux comprendre le sujet au cœur de l'étude.
- Ensuite *un design de questionnaire qualitatif* est préparé et ayant pour but de décrire par exemple les modes de vie, les habitudes, les comportements et les opinions.
- Vient ensuite *la phase de collectes de données* composées des questions de recherche quantitative permettant de mesurer sur un ou des échantillon représentatifs les comportements, les attitudes, les prix, les dépenses, etc.
- *Le traitement des données* nécessite des notions de statistiques. Il s'agit d'analyser les données collectées par une statistique inférentielle. L'utilisation d'un tableur Excel peut être suffisante.
- Enfin, l'étude de marché finit par *une analyse des données finales et une remise de rapport final*.

Pour finir, soulignons que la détermination du marché cible et ses caractéristiques sont absolument capitales pour savoir la stratégie de marketing à adopter.

4.6.2 Cas d'une solution offrant la maintenance prédictive infonuagique : //m⁴ de Matricis Informatique corporation

Étant entendu que l'étude de marché ne fait pas partie du cœur de ce mémoire, nous en proposons juste ici une ébauche afin d'éclairer tout concepteur de solution novatrice pouvant offrir une maintenance prédictive infonuagique. En conséquence, l'étude du marché effectuée

pour la solution //m⁴ n'est pas exhaustive mais donne une idée générale qui pourra être approfondie.

- *Marché cible*

Nous nous sommes concentrés sur l'exploration du marché de la province du Québec au Canada suivant la classification des entreprises dressée dans le tableau A III-1 de l'annexe III en nous inspirant du site du registre des entreprises du Québec.

La liste ne peut être exhaustive. La pertinence de l'adoption d'une politique de maintenance prédictive infonuagique est effective pour tous les types d'industries : les hôpitaux et polycliniques, les actifs dans le domaine de la construction et du génie civil etc. Les types d'industries citées pour la province du Québec dans le tableau A III-1 sont reproductibles à l'échelle du Canada, à l'échelle continentale et à l'échelle mondiale; traduisant l'immensité du marché potentiel.

En nous basant sur le sondage mené par Manufacturiers et Exportateurs du Québec (2007), nous avons produit le tableau 4.1 suivant qui regroupe un sondage auprès de 17 entreprises dans la province du Québec sur l'utilisation de la GMAO au sein de ses entreprises au Québec. Notons qu'aucune précision n'a été apportée sur les types de progiciels de GMAO en utilisation par entreprise et aussi que la date de l'enquête suggère une enquête plus actualisée.

Tableau 4.1 Utilisation des progiciels de GMAO par les entreprises au Québec
Tiré de (Manufacturiers et Exportateurs du Québec (2007), P. 46 à 54)

Utilisation de la GMAO	Résultat de l'enquête
Gestion des Documents et Dessins	35% utilisent leur GMAO, 41% le font à l'extérieur de la GMAO et 24% n'ont aucun système de gestion des documents et dessins.
Gestion des Procédures techniques	23% le font, 65% utilisent des systèmes connexes et 12% ne le font pas.
Gestion de criticité des équipements	59% le font, 6% le font à l'extérieur des GMAO et 35% ne le font pas.
Ordonnancement des Bons de travail	43% le font, 19% utilisent d'autres outils, et 38% n'en font pas.
Suivi des conditions (avec leur GMAO)	25% le font, 12% le font à l'extérieur des GMAO et 63% ne le font pas.

- *Fournisseurs*

Les principaux fournisseurs sont toutes les entreprises qui doivent être sollicité dans les processus design, de marketing, de vente, d'installation ou du service après-vente. Un principal fournisseur pour la solution //m⁴ est une entreprise experte dans le domaine de collecte et de traitement des données de surveillance d'état des actifs pour produire des pronostics de défaillance. Une combinaison avec la solution //m⁴ de Matricis qui comporte déjà des fonctionnalités d'initiation de processus de maintenance et d'infonuagique, rendra cette dernière plus complète et donnera une solution complète pour les différents clients. Les conditions de sollicitation (prix de service, degré d'implication, présentation du produit de l'entreprise experte, etc.) vont influencer considérablement le prix de vente de la solution //m⁴.

- *Exemple de Concurrents*

La maintenance prédictive infonuagique est très récente et encore peu connue aussi bien dans le domaine de la recherche que dans le domaine de l'industrie. Selon nos recherches documentaires que nous avons effectuées, plusieurs solutions peuvent être citées comme étant aussi bien des concurrentes directes ou des concurrentes indirectes de la solution //m⁴ de Matricis informatique.

En ce sens, toute solution se basant sur une maintenance analytique pour optimiser la performance de la gestion des actifs physiques est potentiellement une concurrente directe ou indirecte de la solution //m⁴.

Par exemple, les deux géants américains IBM (International Business Machines corporation) et GE (General Electric) ainsi que les deux géants allemands SAP (Systems, Applications and Products for data processing) et Bosh sont des pionniers dans la conception de solution pouvant offrir une maintenance prédictive avec intégration du concept de connectivité informatique M2M (Machine-to-machine) ou encore IoT (Internet of Things ou Cloud of things) (ABIresearch, 2014).

Selon toujours ABIresearch (2014), d'autres entreprises telles que RapidMiner et Blue Yonder ou encore Predikto et Mtell sont aussi dans la course.

Un autre concurrent sans doute indirect pour la solution //m⁴ est le Watchdog Agent Toolbox de l'IMS (Intelligent Maintenance Systems) qui est un concept de maintenance intelligente. Sa description nous est donnée par le Dr Jay Lee expert, en systèmes intelligents de maintenance, qui est d'ailleurs l'un des pionniers de cette nouvelle conception d'outils intelligents de maintenance au sein du centre IMS. Dans le premier chapitre de ce mémoire, ses travaux ont été cités à maintes reprises, que ce soit ceux réalisés en 2006 ou ceux publiés en 2013. Mais le plus remarquable qui s'apparente au concept de //m⁴ est son article de 2013 qui montre un schéma global du cloud-based PHM system (PHM est mis pour Prognostic and Health Management).

Mais là où l'outil de IMS devient puissant, c'est l'intégration du maintenance toolbox, le WatchDog agent conçu depuis 2006, alors que le cloud-based PHM est conçu en 2013, qui permet d'intégrer une extraction et une exploitation des historiques des machines, des données de surveillance d'état des machines et même les avis d'experts pour faire des diagnostics, des pronostics et des mesures de performances. En outre, le WatchDog agent toolbox se compose de hardware et de Software dédiés.

En d'autres termes, le concept de l'IMS permet de faire de la maintenance prédictive infonuagique en utilisant son propre outil intelligent de maintenance qui est le WatchDog agent Toolbox. L'extrait étant un Paas (Pronostics as a service).

De toute évidence, ce concept de l'IMS est d'une concurrence élevée pour //m4, mais il ne peut s'adresser qu'aux grandes entreprises qui ont déjà une politique de maintenance prédictive ou du moins qui en désirent en avoir, alors que //m⁴ peut cibler d'autres clients de politique de maintenance encore peu avancée.

Cependant, il semble que l'avantage de la solution //m⁴ face à tous ces concurrents, réside dans la particularité de la solution //m⁴ à automatiser les processus de maintenance ainsi que son intégration aux systèmes de maintenance existants.

Toutefois, il est important de souligner qu'une connaissance approfondie des solutions offertes par ces différents concurrents présumés de la solution //m⁴, exige une étude de marché exhaustive et complète. Seule une telle étude exhaustive de marché pourra permettre de définir avec précision et exactitude les solutions offertes par tous les concurrents avec une description comparative entre les caractéristiques de ces produits et celles de la solution //m⁴.

- *Les réglementations*

Les lois, les réglementations et les normes sont celles régissant tout produit dans le domaine de l'ingénierie industrielle dans la province de Québec et celles dans les autres

provinces en cas de désir d'extension de la clientèle. Il est nécessaire que ses normes et ses réglementations soient strictement respectées par le promoteur de //m⁴ car elles sont incontournables.

- *Environnement global*

La solution //m⁴ doit tenir compte de l'environnement PESTE impliquant l'influence des politiques (P) l'environnement économique (E) et Social (S), l'évolution technologique (T) et le concept de développement durable qui intègre le respect de l'environnement. Toutes ces considérations doivent être intégrées à la commercialisation de la solution //m⁴ car, elles sont non seulement source de compétitivité, mais aussi source de pérennisation de la performance.

4.7 Grille d'évaluation multicritère

À présent nous suggérons une grille multicritère en guise de récapitulation de l'évaluation de la trousse d'opportunités technico-économiques conçue. Le but est de prendre les opinions d'un panel d'experts en vue d'apporter d'éventuelles améliorations de la qualité du travail réalisé dans des recherches ou des travaux futurs. Précisons que ces experts composés de l'équipe du partenaire industriel (Matricis Informatiques Inc) ne donnent que leur avis et ne produisent aucune information sur eux-mêmes.

En tout, trois tableaux sont soumis :

Le premier tableau A V-I contient la pondération des critères suivant leur importance sur une échelle de 0 à 10. Ces critères sont : compréhension des raisons qui expliquent la non-adoption de la maintenance prédictive infonuagique par les entreprises, la présentation et l'explication de la maintenance prédictive infonuagique, la démonstration de l'adéquation entre raisons de non-adoption et l'explication des avantages de son adoption, la justification de l'implantation de toute solution offrant la maintenance prédictive infonuagique pour les entreprises.

Le deuxième et le troisième tableau abordent respectivement les évaluations des scénarios faisables par pondérations des critères ci-dessus cités sur la même échelle de 0 à 10 *avant et après* la conception de la trousse d'opportunités technico-économiques avec l'appui du contenu de ce mémoire. Nous avons reporté les résultats de ces tableaux en annexe V.

4.8 Limites et recherches futures

Ce mémoire est un mémoire de type recherche-action. Cependant, comme tout mémoire, la démarche adoptée dans la recherche de solution de la problématique et les hypothèses de départ, ne peut être considérée comme une clé magique et il est important de définir certaines limites à notre démarche. Aussi, la maintenance prédictive infonuagique étant une récente forme de maintenance intelligente, il est évident que la littérature sur la question sera beaucoup plus riche dans les années à venir. Une réitération des développements futurs pourront donc permettre de raffiner notre démarche proposée dans ce mémoire. Ainsi, nous pouvons citer quelques limites de notre approche de solutions comme suit.

Tout d'abord, les avantages supposés de la maintenance prédictive infonuagique ne peuvent être effectifs que si les diagnostics et les pronostics sont fiables. Or, la fiabilité de ces diagnostics et pronostics est dictée par une collecte de données de quantité et de qualité ajoutée à un traitement efficace et une exécution parfaite des décisions. C'est donc toute une chaîne d'éléments de fiabilité concourante.

Il est donc nécessaire que tous ces aspects soient intégrés dans une étude les considérant comme des intrants afin de définir une fiabilité résultante comme extrant.

Ainsi, de façon plus détaillée, la collecte des données doit être faite avec des technologies ou des infrastructures fiables disposées aux endroits pertinents pour permettre recueillir des informations de quantité et de qualité. Une étude peut permettre par exemple, d'établir la fiabilité intrinsèque de ces infrastructures telles que les capteurs qui sont aussi des actifs et même les technologies d'information utilisées.

De même, le traitement des données collectées nécessite les connaissances et avis d'experts ou de personnes hautement qualifiées qu'elles soient impliquées de proche ou de loin. En effet, ce sont les résultats issus du traitement de ces données supposées de qualité au préalable qui permettront d'initier les processus de maintenance promus par les solutions offrant la maintenance prédictive infonuagique.

Dans cette perspective de collecte et de traitement des données des multitudes de capteurs ainsi que des informations de maintenance pour éclairer dans les prises de décisions en maintenance prédictive, des applications révolutionnaires de données massives (en anglais Big Data) apporteront de grands changements. En effet, avec le Big Data, les données de maintenance aussi volumineuses et variées qu'elles soient, seront traitées et visualisées en temps réel de manière à produire une valeur ajoutée pour mieux éclairer les gestionnaires de maintenance. L'exploration des opportunités qu'offrent les applications de données massives (Big Data) peut être un catalyseur des opportunités technico-économiques qu'offre la maintenance prédictive infonuagique. Compte tenu de l'étendue des développements que ce concept révolutionnaire peut impliquer, nous n'en avons pas fait cas dans ce mémoire.

Quant à la fiabilité conceptuelle et la fiabilité opérationnelle de l'application de la solution conçue par les concepteurs et offrant la maintenance prédictive infonuagique, elle impacte les prises de décisions dans les processus de maintenance et en dicte la performance. Dans ce mémoire, nous avons supposé ces deux types de fiabilités sont voisines de un (1). À priori, tout semble probable que la fiabilité intrinsèque ou conceptuelle de la solution //m⁴ soit voisine de (1), en ce sens qu'elle semble être conçue au respect des critères de fiabilité conceptuelle requis pour toute solution offrant la maintenance prédictive, et cités par Prouty et Paquin (2013) comme suit :

- Pouvoir collecter les données fiables et exactes en temps réel et les rendre disponibles de façon centralisée.
- Avoir la capacité de gestion fiable des volumes massifs de données collectées;

- Intégrer l'analyse prédictive par des modèles fiables;
- Intégrer des processus d'affaires définis et exécutés suivant les stratégies de maintenance adoptées;
- Analyser et surveiller les données d'état des actifs et produire au bon moment (ni trop tôt, ni trop tard) des avertisseurs d'écart de performance à l'endroit des gestionnaires;
- Avoir une interopérabilité avec d'autres interfaces de gestion au sein de l'entreprise telles que : les ERP, les GMAO, etc.;
- Définir un tableau de bord fait d'indicateurs de maintenance permettant de visualiser, de suivre et d'améliorer sa performance.

Autre limitation s'exprime par le fait que l'impact de la maintenance prédictive infonuagique ne peut se faire ressentir sur la performance des actifs physiques dans une entreprise dont la politique, la stratégie et les objectifs ne sont pas clairement définis. Mieux, lorsque cette entreprise dispose d'un logiciel de GMAO, ce dernier devra avoir une fiabilité conceptuelle et opérationnelle avec des fonctionnalités utilisées à bon escient.

Par ailleurs, le choix et l'implantation d'une politique de maintenance prédictive infonuagique est un projet en soi comme tout autre et exige un investissement conséquent ainsi qu'une démarche rigoureuse basée sur des objectifs clairement définis, les coûts, le risque, la qualité et le temps.

Enfin, la trousse conçue n'est pas exhaustive et n'est pas une trousse magique. Elle nécessite des améliorations continues au fur et à mesure que la littérature sur ce nouveau concept sera plus élaborée. De même, les améliorations continues de cette trousse pourraient être faites par réitération du retour d'expérience des concepteurs de solution offrant la maintenance prédictive infonuagique issu de leurs actions de prospection et de vente auprès de leur

clientèle cible. Les raisons de non adoption de la politique de maintenance évoquées dans ce mémoire ne peuvent être limitatives. Plusieurs autres raisons existent certainement.

Notons également que la prospection et la vente sont des concepts complexes dont la réussite ne peut être strictement réduite à une trousse d'outils ou à des processus figés car, elles impliquent aussi bien de bons outils, mais surtout la personnalité et la culture intellectuelle et pratique du vendeur ainsi que son habileté à déployer les outils de la trousse de façon adéquate au bon moment à la bonne personne.

Résumé du quatrième chapitre

Dans le chapitre 3 de ce mémoire, nous avons élaboré le référentiel multicritère technico-économique pouvant aider toute entreprise offrant une solution de maintenance prédictive infonuagique à mieux s'outiller pour convaincre ses potentiels clients du monde industriel. Ce référentiel permet d'éclairer aussi bien le monde industriel que tout concepteur de solution offrant la maintenance prédictive infonuagique à mesurer la performance de la fonction maintenance, à faire son suivi et apporter des améliorations si nécessaires. Ce référentiel fait partie intégrante de la conception de la trousse d'opportunités technico-économiques qui inclut également la compréhension des raisons qui expliquent la réticence des entreprises à adopter la maintenance prédictive infonuagique, les bonnes pratiques de la gestion des actifs physiques, les explications des avantages de la maintenance prédictive infonuagique, son impact sur la gestion des actifs physiques et son enrichissement des fonctionnalités de GMAO.

Dans ce chapitre 4 nous avons fait une évaluation de la trousse d'opportunités technico-économiques conçue dans le but, d'une part, de mesurer l'impact de cette trousse sur la compréhension des enjeux de la maintenance prédictive infonuagique et les raisons de sa non-adoption par les entreprises. D'autre part, de mesurer la compréhension de l'adéquation entre les raisons de non-adoption et les solutions proposées pour faciliter son adoption ainsi que la justification de son implantation dans les entreprises.

Aussi dans ce chapitre 4 nous avons proposé quelques techniques de vente pouvant aider toute entreprise offrant des solutions de maintenance prédictive infonuagique à vendre son produit ou son service. Nous avons mis l'accent sur le fait que le vendeur devrait chercher à comprendre pourquoi l'acheteur achète et non se demander comment il doit vendre son produit ou service. De plus, nous avons proposé le processus global d'une étude de marché et en particulier une étude de marché dans la province du Québec, pour la solution //m⁴ de Matricis informatique qui est un exemple de solution offrant la maintenance prédictive infonuagique, afin de définir sa clientèle potentielle, ses fournisseurs, ses concurrents en

particulier Watchdog Agent Toolbox de l'IMS (Intelligent Maintenance Systems). Nous avons également fait part des résultats d'une enquête menée par le groupe Manufacturiers et Exportateurs du Québec (MEQ) sur l'utilisation des progiciels GMAO par les entreprises dans la province du Québec.

Une récapitulation a été faite suivant des grilles d'évaluation multicritère avec des pondérations de critères de compréhension des enjeux de la maintenance prédictive infonuagique, des raisons de sa non-adoption et les solutions proposées pour y remédier, et la justification de son implantation dans les entreprises. Enfin, nous avons examiné les diverses limites de notre démarches et avons fait des recommandations pour les recherches futures.

CONCLUSION

Au terme de ce mémoire de recherche-action, nous avons essayé de reformuler le thème de ce projet qui porte sur la conception d'une trousse d'analyse d'opportunités (technico-économiques) pour l'implantation d'une solution enrichissant les systèmes de GMAO existants. Ainsi, nous avons examiné les raisons qui expliquent la non-adoption de la maintenance prédictive infonuagique par les entreprises qui, ipso facto, hésitent à se procurer toute solution offrant cette forme de maintenance contemporaine. Et pourtant, cette nouvelle forme de maintenance n'est qu'une réponse aux actifs physiques intelligents qui exigent de nos jours des outils intelligents pour optimiser leur performance. En réalité, depuis l'essor technologique sans précédent qui a marqué la révolution industrielle, les innovations technologiques n'ont cessé de s'accroître. Omniprésentes de nos jours, ces technologies ont un impact notable sur la conception des actifs physiques en les rendant plus complexes. Une des conséquences directes de ces développements technologiques rapides est l'impact sur la conception des actifs physiques devenus intelligents et rendant de ce fait plus complexe la mission de la fonction maintenance qui désormais doit devenir plus analytique et s'armer d'une poly technicité accrue mais également de bonnes méthodes de gestion afin de démontrer une optimisation de son efficacité et de son efficacité. C'est pourquoi la fonction maintenance doit définir une politique de maintenance intelligence pour répondre à ces actifs intelligents. Les avantages d'une telle politique de maintenance moderne se traduisent par un impact notable sur la gestion des actifs physiques et définissent des opportunités technico-économiques en termes d'optimisation de sécurité, coûts, temps et ressources.

Nous avons appris grâce à la synthèse des meilleures pratiques selon le PAS 55, que la maintenance n'est qu'une composante de la gestion des actifs physiques et qu'une gestion réussie de maintenance exige la prise en compte de façon holistique de toutes les autres composantes de l'entreprise dont elle dépend strictement. De même nous avons appris que l'optimisation de la performance de la fonction maintenance dépend d'un choix adéquat de sa politique et doit être strictement alignée sur la politique et les objectifs de l'entreprise.

Pour les actifs physiques intelligents contemporains, la maintenance prédictive infonuagique qui est une maintenance intelligente novatrice, semble être une aubaine que toute entreprise ayant des actifs critiques devrait adopter sans hésiter. Elle permet d'investir pour optimiser les processus de maintenance source de rentabilité pour l'entreprise, aux dépens d'un investissement pour améliorer les opérations de maintenance éprouvées et peu rentables de nos jours. Autrement dit, investir pour optimiser les processus de maintenance vaut mieux qu'investir pour améliorer les opérations de maintenance. D'ailleurs des concepteurs offrant une telle solution à l'instar de la solution //m⁴ de Matricis Informatique, commencent par voir le jour pour vendre ce nouveau concept mais les entreprises sont encore loin de percevoir l'impact technico-économique d'une telle maintenance sur la performance de l'entreprise. Autrement dit, les entreprises n'arrivent pas à saisir les opportunités technico-économiques que présente la maintenance prédictive infonuagique pour optimiser la gestion de leurs parcs d'actifs physiques. La conséquence est la difficulté rencontrée par les concepteurs d'une solution offrant ce type de maintenance à promouvoir et à vendre leur produit et service.

La trousse technico-économique conçue dans ce mémoire a été nécessaire pour outiller les concepteurs de solution offrant la maintenance prédictive infonuagique à mieux comprendre ce nouveau concept de maintenance ainsi que de ses avantages afin de pouvoir promouvoir et vendre leur produit à leurs prospects. De façon succincte, l'utilité de cette trousse réside en sa capacité d'éclairer les protagonistes (vendeurs de solution offrant la maintenance prédictive infonuagique et leurs clients) sur les points tels que :

- Comprendre les raisons qui expliquent la non-adoption de la maintenance prédictive infonuagique par les entreprises,
- Comprendre et expliquer les avantages et les opportunités dont peuvent jouir toute entreprise qui prend l'initiative de choisir une telle politique de maintenance pour gérer son parc d'actifs,
- Etablir l'adéquation entre les problèmes de non-adoption et l'explication des opportunités que présente une telle maintenance contemporaine,

- Pouvoir justifier aux entreprises son implantation ainsi que son impact sur la performance de la maintenance des actifs physiques ainsi que les progiciels de GMAO.

Plus amplement, nous avons analysé et développé : le besoin de bien comprendre et d'adopter les meilleures pratiques en matière de gestion des actifs physiques qui se basent principalement sur les différentes dimensions conjointes du système de gestion des actifs ainsi que les composantes incontournables de ce dernier. De même, le besoin pour les entreprises de bien comprendre le concept de gestion performante de la fonction maintenance ainsi que la politique de maintenance prédictive infonuagique ont été analysés. La raison essentielle expliquant la réticence à l'adoption de cette nouvelle forme de maintenance qui s'exprime aussi par le besoin de comprendre l'impact positif notable de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques et sur les progiciels de GMAO. Le manque d'outils et d'arguments technico-économiques pour les concepteurs d'une telle solution, pouvant leur permettant de convaincre leurs prospects, n'est du reste.

Pour développer ces quatre points ci-dessus, nous avons été amenés à faire l'état des lieux par une revue de littérature pertinente sur la maintenance prédictive infonuagique qui combine les avantages de la maintenance prédictive traditionnelle et ceux de l'infonuagique. Nous avons fait une synthèse des meilleures pratiques en matière de gestion des actifs physiques recommandées par le PAS 55 de l'IAM (Institute of Asset Management) et le BSI (British Standard Institute). Et, puisque ce concept de maintenance prédictive infonuagique est assez nouveau, peu d'études y sont consacrées ; cependant nous avons pu avoir assez d'arguments sur les avantages de la maintenance prédictive infonuagique suivant la littérature parcourue et nous en avons produits une synthèse.

L'analyse des concepts utiles dans l'adoption de cette nouvelle forme de maintenance nous a permis de constater que cette forme de maintenance est très évoluée et exige une certaine maturité en gestion de maintenance de toute entreprise candidate, mais aussi qu'elle doit s'appliquer aux composants ou modules critiques d'un actif critique. En outre, le choix d'une politique de maintenance est très complexe et il est nécessaire d'avoir un aperçu du schéma

du chemin décisionnel pouvant mener à l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique.

Par ailleurs, la compréhension des avantages ou des opportunités de la maintenance prédictive infonuagique ne suffit pas à elle seule à amener les entreprises à opter pour cette forme de maintenance. Des outils purement commerciaux sont nécessaires. C'est pourquoi il est nécessaire que les concepteurs puissent faire une étude de marché afin de sélectionner les clients potentiellement qualifiables (par évaluation de leur niveau de maturité en gestion de la maintenance) et d'adopter un processus approprié de techniques de vente en se servant des outils explorés dans ce mémoire. Ces clients qualifiables sont représentés en premier ressort par leurs responsables du service maintenance et de la production qui, une fois convaincus des opportunités de cette nouvelle forme de maintenance, doivent tenir un langage approprié pour convaincre la haute direction de leur entreprise à investir dans le changement de politique de maintenance.

La maintenance prédictive infonuagique a un impact positif sur le cycle de vie des actifs physique depuis leur conception (design) jusqu'à leur mise au rebut. Elle représente une forme de maintenance intelligente dont les avantages sont incontestables et qui devraient inciter les entrepreneurs à l'adopter. Les avantages de la combinaison de l'infonuagique avec la maintenance prédictive traditionnelle donnent l'avantage de réduire entre autres les coûts d'infrastructures dispendieuses autrefois nécessaires en maintenance prédictive traditionnelle. L'infonuagique représente un moyen pouvant résoudre l'incohérence temporelle entre maintenance prédictive traditionnelle et progiciels de GMAO ainsi que l'enrichissement des fonctionnalités de ces derniers.

Malgré tous ces développements de concepts, d'analyses d'opportunités technico-économiques et la trousse d'outils technico-économiques conçue dans ce mémoire, nous pensons que d'autres études sont nécessaires car le cadrage conceptuel abordé dans la reformulation du sujet sont assez riches et des approfondissements seront utiles. À l'ère de la maintenance analytique, la maintenance prédictive infonuagique s'impose comme une

maintenance du futur capable de révolutionner la gestion des actifs physiques et la maintenance industrielle. Au fur et à mesure que d'autres études seront faites dans les années futures, mieux le monde industriel et académique sera encore plus éclairé sur cette nouvelle forme de maintenance qui offre tant d'opportunités technico-économiques et qui représente une aubaine pour les entreprises.

ANNEXE I

LES PROGICIELS DE GMAO : FONCTIONNALITÉS ET LISTE DES PLUS IMPORTANTS VENDEURS

Tableau A I-1 Récapitulation des fonctionnalités des GMAO
Inspiré de Marc Frédéric (2011, p.176), Benissaad, 2007-2008, p. 9, 92 à 107)

Fonctionnalités	Descriptions- Exemples de tâches
Management de la maintenance	-Définir et gérer la politique, la stratégie et les objectifs de l'entreprise
Gestion du parc d'actifs	Identification de chaque actif, accès aux fiches machines et spécifications techniques, accès aux historiques complets, maintenir la connaissance des équipements etc.
Gestion des tâches de maintenance	Bons de travaux (BT), ordres de travaux (OT), rapports d'interventions,
Gestion des indicateurs de performance et de ratios et du suivi opérationnel	KPI fondés par exemple sur la qualité, la sécurité, les coûts, les temps, tableau de bord etc.
Gestion des travaux de maintenance	Maintenance préventive, curative, les inspections etc.
Gestion des grands travaux de maintenance	Les grands arrêts, les travaux neufs, les investissements
Gestion de la planification	Plan et ordonnancement de maintenance, établissement d'échéancier d'exécution des tâches de maintenance.
Gestion des ressources humaines	Gestion des compétences, recrutement, déploiement pour les travaux, promotion, calendrier de travail, suivi des stages et formations, etc.
Gestion des stocks	Pièces de rechange, magasins de stockage, pièces disposés, etc.
Gestion achats et des approvisionnements	Contrats, devis, approvisionnements,
Analyse des défaillances	Analyse des défaillances par AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et leur Criticité, analyse par Pareto, HAZOP (<u>Hazard and Operability studies</u>) ou analyse des risques
Gestion du budget	Optimisation des coûts, gestion du budget, le retour sur investissement, etc.
Fonctionnalités complémentaires ou interfaçages utiles	Logiciel de paie et de comptabilité, logiciel de la gestion de la production, lecture des badges, logiciel de gestion des ressources humaines de l'entreprise, etc.

Tableau A I-2 Liste des Progiciels de GMAO
 Tiré de AFIM-<http://www.afim.asso.fr/actifs/gmao/gmao-progiciels>
 (consulté le 24 décembre 2013)

65 Progiciels	56 Editeurs
Advanced Maintenance Procedure System	40-30
AllMaint	Erlane
Altair	DSD System
AQ Manager Full Web	Bureau Conseils et Services
AQ Manager GMAO	Bureau Conseils et Services
AssetPlus	GE Healthcare
AS-Tech Web Office	AS-Tech Solutions
Athénéo GMAO	Mismo Informatique
Axel Maint	Dimo Maint
BALinter	Addenda Software
BALinter	Addenda Software
Be Safe	JL International
CapiLog	CapiTechnic
Carl Source Factory	Carl Software
Cindy	Elapse
Clarisse	Elfa Systèmes
Connect Forces On Demand	Synchroteam
Corim Business	Corim Solutions
Corim Progress	Corim Solutions
Coswin 8i	Siveco Group
Easy-Cam	Proxim Solutions
Energie Patrimoine	ID Bat
Epsilon	Avetech
G2IT	ASP GMAO
Game	4DConcept
Gigamaint	QI Informatique
G'ma	G'ma
GMAO Accéder	ERM Automatismes industriels
GMAO Gestmain	JPC Softqual
GMAO Infor EAM	Infor (France) SAS
IBM Maximo Enterprise Asset Management	IBM Software
IFS Applications	IFS France
Incoservice	Incotec
IQ-Gem	Techni'Gestions
Kimoce	Kimoce
K-SAV / K-GMAO	K All
M2P	Infodev
Mainta	Apave
Maintexpress	ACF Maintenance
Managemaint	AS-Informatique SUBTIL EIRL
Maximaint / Minimaint	Dimo Maint
MCS2000	Cogelub
Micromaint	Dimo Maint
Mission GMAO	Alteva
Mister Maint Fusion	Informatique technique et Maintenance
Mister Maint X	Informatique technique et Maintenance
Mobile+Manager	Sydev
Optima V12	KPF Nord
Optimaint	Apisoft International
Praxedo intervention	Praxedo
Progib	Progib
Rimses	RealDolmen
Sam	Site Alpha
SamFM	Site Alpha
Service Maint	Dimo Maint
Service Maint	Dimo Maint
Service Maint	Dimo Maint
Sphinx Manager	Sphinx Manager
SyGmo	TPM Assistance
Titan GMAO	EIS
Traq360 InspectBox	Itirion
Tririga	IBM Software
Twimm	Conselium
Ultranalysis Suite	SDT International
Vam Camka System	Camka System
WebTMA	TMA Systems
Winsav	Axillog

ANNEXE II

RÉCAPITULATION DES OUTILS DE LA TROUSSE MULTICRITÈRE TECHNICO-ÉCONOMIQUE CONCUE

Tableau A II-1 Examen de qualification d'une entreprise à l'adoption de la
maintenance prédictive infonuagique

Macro questions d'évaluation de qualification	Nulle (=1)	Faible (=2)	Moyen (=3)	Excellent (=4)
Organisation et Maturité de la fonction maintenance: <ul style="list-style-type: none"> • Existence de sous-fonctions distinctes : Méthode-Ordonnancement- Réalisation • Existence d'un tableau de bord • Historique pertinent des actifs, • Bonne gestion du stock, • Existence d'un processus défini de maintenance, • Gestion des tâches de maintenance • Politique de maintenance bien connue • Bonne gestion des documents de maintenance : BT, rapports techniques, fiches machines, manuels techniques, etc. 				
Sur le plan technique : <ul style="list-style-type: none"> • Vue d'ensemble du parc bien inventorié, son ampleur et la connaissance précise des actifs critiques, leur âge moyen par rapport au cycle de vie connu, • Bonne gestion technique du parc d'équipements • Traçabilité des instructions d'exécution des tâches de maintenance 				

<ul style="list-style-type: none"> • Bonne gestion des tâches de maintenance préventive et corrective, • Suivi technique des documents • Contrôle d'activités de maintenance • Gestion des grands travaux de maintenance • Bonne Gestion des documents techniques • Analyse des causes de défaillance 				
<p>Sur le plan économique et financier:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niveau de gestion des données sur les différents coûts directs et indirects de maintenance, les différents investissements en maintenance, • Les coûts d'assurance, • Les données sur les budgets en maintenance • Budget propre à la maintenance • La capacité d'investir dans l'adoption de la maintenance prédictive infonuagique 				
<p>Ressources humaines et Compétences en maintenance:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Qualification (niveau de compétence) en interne ou en externe des ressources en maintenance. • Formation continue du personnel de maintenance • Hiérarchisation des responsabilités 				
<p>Sur le plan du respect des normes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La connaissance et les stratégies déployées dans le respect des normes de SST (Santé et Sécurité au Travail) et de la protection de l'environnement • Formation continue du personnel de 				

maintenance en SST				
<p>Niveau de maturité de la gestion des TIC:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niveau d'intégration des TIC (Technologies de l'Information et la Communication) en gestion de maintenance • Existence de GMAO • Gestion informatique des flux d'informations de maintenance 				
<p>Ressources matérielles et logistique en maintenance:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Outillages en maintenance • Ressources et Organisation matérielles • Organisation des ateliers de maintenance • Bonne gestion de la logistique en maintenance • Possession ou possibilité d'acquérir des ressources matérielles et logistiques appropriées pour une maintenance prédictive infonuagique. 				

Figure A II-1 Chemin décisionnel pour l'adoption d'une maintenance prédictive Infonuagique
 Inspirée de F. Monchy (2010, p. 26), Michael Menzel et al. (2010)

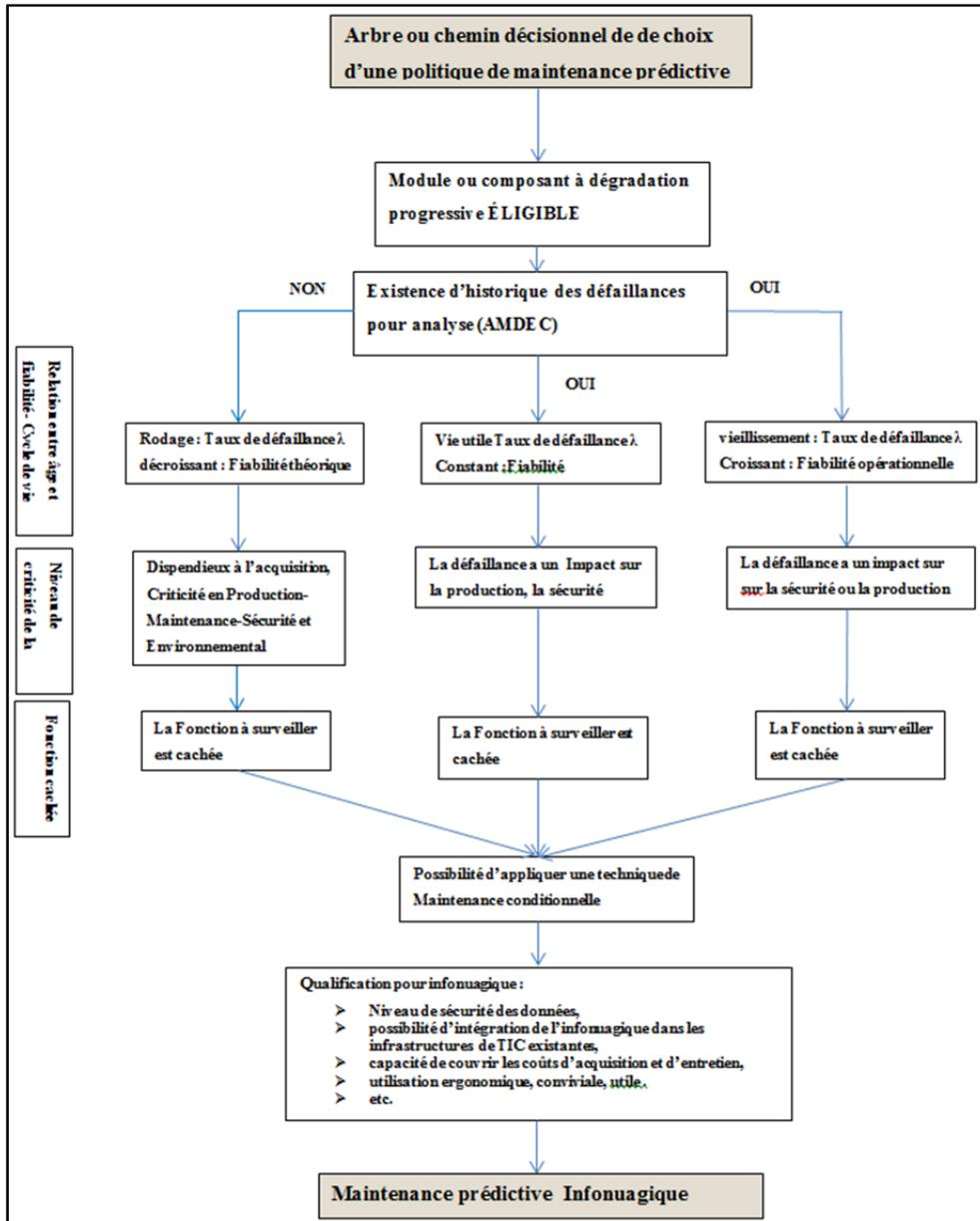


Tableau A II-2 Référentiel Multicritère Technico-Économique
 Inspiré de AFNOR XP X60-020 (1995), Bo Sun et al. (2012)
 Manufacturiers et Exportateurs du Québec MEQ (2007)

TITRE DU TABLEAU: REFERENTIEL MULTICRITERE TECHNICO-ECONOMIQUE				
ETAT DES DONNEES: AVANT ou APRES le changement de politique de maintenance (À préciser)				
INDICATEURS DE MAINTENANCE (FORMULE DE RATIO)				
SECTEURS	1- SECURITE et ENVIRONNEMENT	2- COÛTS	3- TEMPS	4- RESSOURCES (Humaines et matérielles)
1- Santé et Sécurité au Travail (SST)	1.1.1 Évaluation de la maturité en prévention des accidents selon les normes du SST $\frac{\text{Nombre d'accidents avec arrêts}}{\text{Nombre d'heures travaillées}} \times 10^6$	1.2.1 Primes d'assurance de SST Primes d'assurance (en devise locale) Montant de masse salariale assurable	1.3.1 Évaluation de l'importance des temps consacrés à la formation des employés dans la prévention des risques $\frac{\text{Temps de formation en SST}}{\text{Temps total de formation en maintenance}}$	1.4.1 Taux de fréquence des accidents affectant les ressources $\frac{\text{Nombre d'accidents avec arrêts}}{\text{Nombre d'heures travaillées}} \times 10^6$
	1.1.2 Évaluation de l'ampleur du respect ou non des normes de SST $\frac{\text{Nombre jours perdus}}{\text{Nombre d'heures travaillées}} \times 10^3$	1.2.2 Importance des coûts de programmes (formation en SST, observation comportement pour prévenir les risques) $\frac{\text{Coûts de formation en SST}}{\text{Coûts globaux de formation en maintenance}}$	1.3.2 Importance des temps d'absentéisme imputable à la SST $\frac{(\text{Nombre de personnes}) \times (\text{Nombre d'heures d'absence effective})}{(\text{Nombre de personnes inscrites}) \times (\text{Nombre d'heures standard prévues})}$	1.4.1 Taux de gravité des accidents affectant les ressources $\frac{\text{Nombre jours perdus}}{\text{Nombre d'heures travaillées}} \times 10^3$
	Nombre de jours perdus inclut ceux en assignation temporaire ou ceux en perte de temps	1.1.3 Pourcentage des heures consacrées aux projets et l'amélioration de la sécurité et la protection de l'environnement $\frac{\text{Heures consacrées aux projets et amélioration}}{\text{Heures totales travaillées à la maintenance des actifs de production}}$	1.2.3 Évaluation des coûts dus au non respect des normes Amendes pour non respect des normes Budget fonctionnel en maintenance	Nombre de jours perdus inclut ceux en assignation temporaire ou ceux en perte de temps
2- Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO)	2.1.1 Importance de l'intégration du niveau de criticité des actifs en GMAO $\frac{\text{Nombre d'actifs critiques intégrés à la GMAO}}{\text{Nombre d'actifs à maintenir}}$	2.2.1 Évaluation de la gestion des documents techniques par la GMAO $\frac{\text{Coûts de gestion des documents techniques intégrés à la GMAO}}{\text{Coûts globaux de gestion des documents techniques de maintenance}}$	2.3.1 Efficacité de la GMAO: rapidité de traitement des données ou documents de procédures techniques (calibration, cadencage, ajustements, démontage, etc.) $\frac{\text{Temps de traitement des documents techniques}}{\text{Temps requis en maintenance}}$	2.4.1 Bonne répartition des ressources humaines, variation des effectifs. Peut qualifier la qualité de l'ordonnement $\frac{\text{Effectif de la période P}}{\text{Effectif de la période P-1}} \times 100$
	2.1.2 Facilitation du respect des Normes de sécurité par l'aide de la GMAO $\frac{\text{Nombre d'accidents avec arrêts}}{\text{Nombre d'heures travaillées}} \times 10^6$	2.2.2 Efficacité de l'ordonnement $\frac{\text{Coûts des heures supplémentaires travaillées}}{\text{Masse salariale avec heures régulières de travail}}$	2.3.2 Efficacité de la GMAO: rapidité de réalisation des procédures techniques $\frac{\text{Temps de réalisation des procédures techniques gérés par la GMAO}}{\text{Temps d'indisponibilité pour maintenance}}$	2.4.1 Bonne répartition des ressources humaines, variation des effectifs. Peut qualifier la qualité de l'ordonnement $\frac{\text{Heures supplémentaires travaillées}}{\text{Heures régulières de travail}}$
	Nombre de jours perdus inclut ceux en assignation temporaire ou ceux en perte de temps	2.3.3 Efficacité de la GMAO: ordonnancement des bons de travail $\frac{\text{Temps de réalisation des tâches de maintenance sur Bon de Travail}}{\text{Temps d'indisponibilité pour maintenance}}$	2.3.4 Efficacité de l'ordonnement des Bons de Travail $\frac{\text{Heures supplémentaires travaillées}}{\text{Heures régulières de travail}}$	Nombre de jours perdus inclut ceux en assignation temporaire ou ceux en perte de temps
3- Logistique, Gestion du stock des pièces de rechange, approvisionnement	2.1.1 Importance du respect des normes de sécurité dans la gestion du stock et les tâches connexes telles que la maintenance $\frac{\text{Nombre d'accidents dans la gestion des stocks et des pièces de rechange}}{\text{Nombre d'heures travaillées}} \times 10^6$	3.2.1 Importance de la valeur des pièces de rechange en stock $\frac{\text{Valeur du stock - maintenance d'un actif}}{\text{Valeur de l'actif à maintenir}}$	3.3.1 Importance des temps consacrés à la gestion du stock et les tâches associées telles que la maintenance $\frac{\text{Temps total de formation sur la gestion du stock}}{\text{Temp total de formation en maintenance}}$	3.4.1 Importance de la complexité ou la densité de la gestion du stock et les tâches associées (maintenance, organisation etc.) $\frac{\text{Temps total de formation sur la gestion du stock}}{\text{Temp total de formation en maintenance}}$
	Nombre de jours perdus inclut ceux en assignation temporaire ou ceux en perte de temps	3.2.2 Roulement moyen des stocks $\frac{\text{Valeur des achats annuels pour remplacer les articles disponibles en magasin}}{\text{Valeur des stocks en magasin}}$	Nombre de jours perdus inclut ceux en assignation temporaire ou ceux en perte de temps	Nombre de jours perdus inclut ceux en assignation temporaire ou ceux en perte de temps
4- Organisation du travail et de la main d'œuvre	4.1.1 Efficacité de l'organisation du travail: taux d'accidents par heures travaillées $\frac{\text{Nombre d'accidents avec arrêts}}{\text{Nombre d'heures travaillées}} \times 10^6$	4.2.1 Efficacité de l'organisation du travail $\frac{\text{Coûts directs et indirects de produits de mauvaise qualité sur une période P}}{\text{Revenu de la production pour les mêmes produits sur la période P}}$	4.3.1 Efficacité de l'organisation du travail $\frac{\text{Heures perdues dues à la refabrication des produits de mauvaise qualité}}{\text{Temps total de production}}$	2.4.1 Bonne répartition des ressources humaines, variation des effectifs. Peut qualifier la qualité de l'organisation du travail $\frac{\text{Effectif de la période P}}{\text{Effectif de la période P-1}} \times 100$
	4.1.2 Efficacité de l'organisation du travail pendant la production $\frac{\text{Nombre d'accidents - Actifs en utilisation}}{\text{Durée opérationnelle de l'actif}} \times 10^6$	Nombre de jours perdus inclut ceux en assignation temporaire ou ceux en perte de temps	ou encore $\frac{\text{Heures supplémentaires dues à une quantité de production insuffisantes}}{\text{Temps total de production}}$	2.4.1 Bonne répartition des ressources humaines, variation des effectifs. Peut qualifier la qualité de l'organisation du travail $\frac{\text{Heures supplémentaires travaillées}}{\text{Heures régulières de travail}}$
5- Gestion des travaux	5.1.1 Efficacité de la gestion des travaux de maintenance $\frac{\text{Nombre d'accidents avec arrêts}}{\text{Nombre d'heures travaillées}} \times 10^6$	5.2.1 Importance de la gestion des documents techniques $\frac{\text{coût des documents techniques}}{\text{coûts de maintenance}}$	5.3.1 Importance des activités de préparation de maintenance par rapport aux interventions effectives sur le bien $\frac{\text{temps de préparation de maintenance}}{\text{temps actif de maintenance}}$	5.4.1 Pourcentage des heures travaillées en mode correctif $\frac{\text{Heures travaillées en maintenance corrective}}{\text{Total des heures annuelles travaillées par la maintenance}}$
	Nombre de jours perdus inclut ceux en assignation temporaire ou ceux en perte de temps	5.2.2 Importance de l'outillage par rapport au moyens correspondants en main d'œuvre $\frac{\text{coût de l'outillage et équipements de maintenance}}{\text{coûts du personnel d'intervention}}$	5.3.2 Part des interventions préparées dans toutes les interventions effectuées sur le bien $\frac{\text{temps des travaux préparés}}{\text{temps actif de maintenance}}$	Nombre de jours perdus inclut ceux en assignation temporaire ou ceux en perte de temps

<p>6- Productivité (Rendement et Ratio Maintenance-Production)</p>	<p>6.1.1 Pourcentage des heures consacrée aux projets et l'amélioration de la sécurité et la protection de l'environnement</p> $\frac{\text{Heures consacrées aux projets et amélioration}}{\text{Heures totales travaillées à la maintenance des actifs de production}}$	<p>6.2.1 Efficacité technique de la maintenance</p> $\frac{\text{coût de défaillance}}{\text{coûts de maintenance + coûts de défaillance}}$ <p>6.2.2 Efficacité économique de la maintenance</p> $\frac{\text{coût de maintenance + coûts d'indisponibilité}}{\text{chiffre d'affaires relatif à la production}}$ <p>6.2.3 Jugement du bon usage ou de la bonne politique de maintenance</p> $\frac{\text{coût de maintenance}}{\text{quantité de production}}$ <p>6.2.4 Indicateur financier pour juger du rendement de la maintenance</p> $\frac{\text{coûts de maintenance}}{\text{chiffre d'affaires relatif à la production}}$ <p>6.2.5 Évaluation de la qualité ou taux de qualité</p> <p>Volume de non conformités Volume total de la production</p>	<p>6.3.1 Évaluation des causes d'indisponibilité dues à la maintenance par rapport aux causes externes (énergie, main d'œuvre etc.) ou indépendantes des actions de maintenance proprement dites (temps de remise en service, temps de non-détection de la défaillance etc.)</p> $\frac{\text{Temps propre d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps effectif d'indisponibilité}}$ <p>6.3.2 Temps moyen de remise en service</p> $\frac{\sum \text{des temps actifs de maintenance corrective}}{\text{Nombre de défaillance}}$ <p>6.3.3 Estimation de l'âge moyen du parc d'équipements</p> $\frac{\sum \text{des âges moyens des actifs d'un parc homogènes}}{\text{Nombre d'actif du parc}}$	<p>6.4.1 Pourcentages des heures travaillées en mode urgence</p> $\frac{\text{Heures travaillées en mode urgence}}{\text{Total des heures annuelles imputables à la maintenance des actifs de production}}$
<p>7- Opérationnel (Utilisation)</p>	<p>7.1.1 Accidents dus au non-respect des consignes de sécurité opérationnelles (utilisation ou manipulation)</p> $\frac{\text{Nombre d'accidents avec arrêts}}{\text{Nombre d'heures travaillées}} \times 10^4$ <p>7.1.2 Importance du respect des normes pendant l'exploitation du bien</p> $\frac{\text{Nombre d'accidents - Actifs en utilisation}}{\text{Durée opérationnelle de l'actif}} \times 10^4$	<p>7.2.1 Appréciation de l'importance de la formation du personnel à l'utilisation des actifs et au respect des normes</p> $\frac{\text{coûts de formation du personnel manipulateur}}{\text{Masse salariale du personnel manipulateur}}$ <p>7.2.2 Importance de régler les litiges entre compagnies d'assurance et entreprises assurées</p> $\frac{\text{Montant d'assurance perçu pour actifs brisés en période de garantie}}{\text{Montant d'assurance attendu}}$	<p>7.3.1 Indication de la MTBF (Mean Time Between Failure)</p> $\frac{\sum \text{des temps de bon fonctionnement}}{\text{Nombre de défaillance}}$ <p>7.3.2 Évaluation de la disponibilité opérationnelle du bien</p> $\frac{\text{Temps effectif de disponibilité}}{\text{Temps requis}}$ <p>7.3.3 Comparaison des performances d'exploitation du bien</p> $\frac{\text{Temps de bon fonctionnement}}{\text{Temps requis}}$ <p>7.3.4 Taux d'utilisation du bien ou Rendement synthétique</p> $\frac{\text{Temps de bon fonctionnement}}{\text{Temps effectif de disponibilité}}$	<p>7.4.1 Appréciation de la mobilisation du personnel de maintenance pour des fausses alertes de défaillances des machines</p> $\frac{\text{Nombre d'heures d'interventions justifiées ou non}}{\text{Nombre d'heures travaillées annuellement}}$
<p>8- Cycle de vie de l'actif (augmentation de la durée de vie etc)</p>	<p>8.1.1 Évaluation de la sécurité de l'actif</p> $\frac{\text{Nombre d'accidents durant le cycle de vie de l'actif}}{\text{Durée de vie opérationnelle de l'actif}}$	<p>8.2.1 Coûts de cycle de vie versus valeur productive</p> $\frac{\text{Coûts du cycle de vie de l'actif}}{\text{La valeur productive moyenne de l'actif}}$ <p>8.2.2 Indice financier d'état de l'actif ou du parc d'actifs (indice de retour sur investissement)</p> $\frac{\text{Valeur actuelle de l'actif}}{\text{Valeur à neuf de l'actif}}$ <p>8.2.3 Indice de rallongement de la vie utile d'un actif</p> $\frac{\text{Valeur actuelle de l'actif + coûts des travaux de rénovation}}{\text{Valeur à neuf de l'actif}}$ <p>8.2.4 Indice de mesure de la santé financière de l'actif (pourcentage d'investissement de l'actif)</p> $\frac{\text{Investissements courants (sur une période de temps t) de l'actif}}{\text{Valeur investissement estimé sur une période extrapolée (Investissement cyclé) sur à neuf de l'actif}}$	<p>8.3.1 Évaluation de la durée de vie résiduelle de l'actif</p> $\frac{\text{Durée de vie opérationnelle}}{\text{Durée de vie conceptuelle}}$	<p>8.4.1 Expression de la complexité, ou de la criticité de l'actif durant son cycle de vie</p> $\frac{\text{Temps total de formation durant la durée de vie de l'actif}}{\text{Temps total de formation en maintenance}}$
<p>9- Conception et design</p>	<p>9.1.1 Amélioration à la conception de la sécurité ou du respect des normes par le retour d'expérience</p> $\frac{\text{Nombre d'accidents réduits par l'amélioration de la conception}}{\text{Nombre moyen d'accidents du retour d'expérience}}$	<p>9.2.1 Évaluation de la complexité de la maintenance et des objets de disponibilité</p> $\frac{\text{Coûts de formation en maintenance}}{\text{Effectif maintenance}}$	<p>9.3.1 Caractéristiques intrinsèques des équipements en matière de fiabilité et de maintenabilité</p> $\frac{\text{Temps d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps de fonctionnement ou quantité de production}}$	<p>9.4.1 Évaluation de la complexité de la maintenance et des objets de disponibilité</p> $\frac{\text{Temps de formation maintenance}}{\text{Effectif maintenance}}$ <p>9.4.2 Évaluation de l'évolution des effectifs de maintenance</p> $\frac{\text{Effectif de la période P}}{\text{Effectif de la période P-1}} \times 100$

Tableau A II-3 Quelques avantages de la maintenance prédictive infonuagique sur la gestion des actifs physiques

Design	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation des données décrivant le comportement des actifs suivant les conditions environnementale d'exploitation pour améliorer le design en rendant l'actif plus robuste, plus fiable et améliorer les instructions d'installation, d'utilisation et de maintenance.
Production	<ul style="list-style-type: none"> Permet d'intervenir au bon moment sans nuire à la production Permet à l'entreprise de rester compétitive grâce à une production quantitative et qualitative
Logistique et Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> Constituent deux fonctions clés dans la gestion des actifs. Les maîtriser est source d'optimisation de performance de la gestion des actifs. Optimisation de la gestion des pièces de rechange Améliore la performance (efficacité et efficience) de la maintenance. Amélioration des processus de maintenance Réduit les coûts de maintenance liés à la survenue de la famille des "causes de défaillances non connues" (défaillance non détectée, défaillance intermittente, défaillance non identifiée, contre-épreuve réussie, Évite les remplacements de pièces ayant encore une durée de vie utile, Etc.
Opérationnel	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration de la fiabilité opérationnelle Amélioration de la sécurité et la protection de l'environnement (actif en utilisation). Arbitrage entre les compagnies d'assurance et les assurés sur les causes conflictuelles de défaillances. Rallongement de la vie utile de l'actif par réduction maximale de l'écart entre fiabilité opérationnelle et fiabilité prévisionnelle.
Cycle de vie de l'actif en général	<ul style="list-style-type: none"> Détermination de la durée de vie résiduelle de l'actif. Utilisation des données de cycle de vie pour définir les conditions optimales de mise au rebut ou de disposition de l'actif,

Tableau A II-4 Information générale du prospect

Information Générale	
Note: Il est Souhaitable d'avoir les personnes ressources en maintenance et en production	
Nom de l'entreprise :	
Nom du contact :	
Titre :	
Date :	
Nom de l'entreprise :	
Nom du contact :	
Titre :	
Date :	
= carte d'affaires	

Tableau A II-5 Évaluation de la production du prospect

Type de production :	
Niveau de production :	
Répartition PQ approximative (Produit vs Quantité annuelle)	
Combien de produits fabriqués (diversité) des produits :	
Pareto = Gros vendeurs (gros revenus) = ?	
Importance de la ponctualité des livraison (petitesse de la fenêtre des livraisons)	
Respect (pénalités) des livraisons en juste-à-temps	
(Chiffre d'affaires) :	
Est-ce que la capacité de production est un goulot?	
Pourrait-on vendre plus si on avait plus de capacité?	

Tableau A II-6 Esquisse du schéma fonctionnel de production du prospect

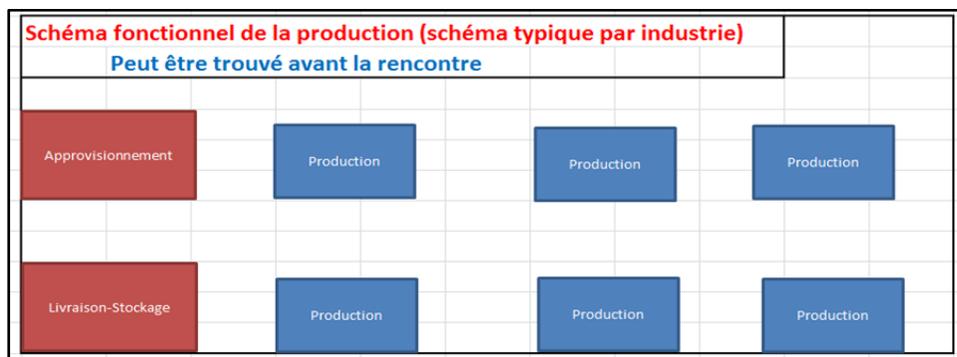


Tableau A II-7 Portrait du parc d'actifs du prospect

Portrait du parc	
Types d'équipements	
Quantité d'équipements	
État des équipements	
Âge moyen du parc (âge actuel moyen/durée de vie)	
(Valeur totale du parc)	
Budget de la maintenance	
Équipements critiques	
Coûts de maintenance (% du budget de maintenance)	
Pertes de production	
Sécurité et environnement	

Tableau A II-8 Répartition budgétaire annuelle du prospect

Répartition budgétaire annuelle							
Budget total de maintenance :	100%	1,000,000 \$	%	\$	% \$ pour Équipements critiques		Économies en prédictif
Main d'œuvre directe :	5%				80%	20%	10% 30%
Pièces :	30%	300,000 \$			Équ. non critiques	Équ. critiques	
Main d'œuvre indirecte :	55%	550,000 \$			240,000 \$	60,000 \$	6,000 \$ 18,000 \$
Sous-traitance/soutien :	10%				440,000 \$	110,000 \$	11,000 \$ 33,000 \$
							17,000 \$ 51,000 \$
Coûts de non-disponibilité							
Gains de capacité :	20%						
Chiffre d'affaires :		10,000,000 \$					
Marge de profit :	15%						
Gains potentiels :		300,000 \$					317,000 \$ 351,000 \$

Tableau A II-9 Grille d'évaluation du niveau de criticité des actifs du prospect

Grille d'estimation		
Usage :		Usage :
Minimum : 10	}	Minimum : 10
Plus probable : 30		Plus probable : 30
Maximum : 100		Maximum : 100
Valeur à utiliser : 38	←	Valeur à utiliser : 38
Usage :		Usage :
Minimum : 10	}	Minimum : 10
Plus probable : 30		Plus probable : 30
Maximum : 100		Maximum : 100
Valeur à utiliser : 38	←	Valeur à utiliser : 38

Tableau A II-10 Évaluation de la maturité en gestion de la maintenance du prospect

Évaluation de la maturité										
Conclusion (avec ou sans le client) (pour estimer l'effort d'accompagnement)										
	Stratégie	Capital humain	Gestion des travaux	Gestion des pièces	Soin de base	Gestion de la performance	Systèmes de support	Fiabilité des actifs	Travail d'équipes	Processus
Excellence	Stratégie globale et plans d'amélioration développés en équipe (maintenance, production, RH, direction)	Multicomptences - Polyvalence complète des corps de métiers Équipes autonomes en place	Cycles de planification à long terme Utilisation régulière de standards et plans de travail	Taux de rotation > 2 Niveau de service > 95% Ruptures de stocks rares	Respect complet des inspections réglementaires Programme de MP intégrant la maintenance conditionnelle Co-travaux évolutifs des tâches mineurs de MP - Équipements en bon état	Tableau de bord prospectif complet pour les équipes Analyse des tendances démontre l'amélioration	Utilisation du système de gestion - GMAO par l'ensemble des usagers avec bonne appropriation NOC-CBM, analyses de fiabilité et systèmes d'aide à la décision en place	Programme de MP complètement défini par la MBF-RCM Analyse des causes fondamentales de défaillance utilisée mais peu requise Standards de maintenance utilisés en conception	Équipes autonomes production - maintenance Support par management et spécialistes Standards de maintenance cohérent en place	Processus efficaces et efficaces Accusés contournements - Processus suivis Révisions régulières pour les maintenir à jour Portions du processus automatisées par les systèmes de gestion
Compétent	Stratégie globale et plans d'amélioration développés par le personnel clé	Multicomptences Équipes mixtes maintenance opération	Processus de planification et d'ordonnement en place pour la plupart des travaux	Taux de rotation > 1 Niveau de service > 95% Ruptures de stock < 5%	Conformité complète à tous les règlements - Respect complet des inspections réglementaires Programme de MP avec quelques maintenances conditionnelles Co-travaux impliqués dans la MP Équipements en bon état	Indicateurs de fiabilité en place Suivi du programme d'amélioration Analyse des tendances commencent à démontrer une amélioration	Utilisation intensive du système de gestion - GMAO principalement par le management Quelques MIDE-CBM, analyses de fiabilité et systèmes d'aide à la décision en place	Maintenance basée sur la fiabilité - RCM utilisée pour élaborer la MP Analyse des causes fondamentales de défaillances en place	Équipes supervisées production - maintenance par secteur ou unité d'attente Standards de maintenance par secteur	Processus efficaces et efficaces Révisions occasionnelles Quelques contournements possibles Processus généralement suivis
Comprend	Stratégie et plans d'amélioration développés par la direction	Quelques multicomptences Répartition des équipes de maintenance avec supervision conventionnelle	Processus d'élaboration de la cédule en place et bonne adhérence Planification pour les travaux majeurs et les arrêts majeurs au fur et à mesure que les demandes apparaissent	Taux de rotation > 0.7 Niveau de service > 90% Analyses de l'inventaire réalisées	Conformité partielle aux règlements - Respect partiel des inspections réglementaires Programme de MP systématique avec un peu de conditionnelle États des Équipements acceptable	Indicateurs de performance de la maintenance de base utilisés	Utilisation d'un système de gestion - GMAO Quelques rapports utilisés Quelques systèmes de MIDE (CBM) en place	Programme d'amélioration de la fiabilité en cours Analyse des causes fondamentales de défaillance et quelques optimisations de la MP en place	Décentralisation géographique mais centralisation hiérarchique en maintenance Équipes de production indépendantes	Processus de maintenance révisés mais pas leurs interfaces Contournement des processus - Processus non respectés
Sensibilisé	Objectifs documentés sans plans d'amélioration	Partiellement décentralisée par métiers	Respect d'environ 50% de la cédule. Planification des arrêts majeurs seulement	Plans d'amélioration en cours Mesure de la performance du magasin nouvellement implantée	Faible conformité aux règlements - Faible respect des inspections réglementaires Développement d'un programme de MP en cours selon méthodes traditionnelles États des Équipements acceptable	Données financières utilisées pour analyser le type de dépenses Quelques enregistrements de pannes documentés	Utilisation rudimentaire du système de gestion - GMAO sans réelle valeur ajoutée Systèmes ad hoc toujours en place Intégration du monitoring des équipements (MIDE-CBM) considérée	Analyses d'arrêts effectuées Quelques améliorations implantées	Mélange de ressources centralisées et assignées à des secteurs de la production Supervision conventionnelle	Processus documentés mais jamais révisés Contournement des processus inefficaces évidentes particulièrement aux changements de quarts, transfert d'information
Ignorant	Stratégie non-documentée Maintenance majoritairement réactive (pannes)	Organisation centralisée par corps de métier	Pas de planification, peu d'ordonnement et faible conformité à la cédule	Ruptures de stocks fréquentes Faible niveau de service Travaux interrompus par manque de pièces	Faible conformité aux règlements - Faible respect des inspections réglementaires Programme de MP de base ou inexistant Équipements en piètre état	Seulement des mesures financières effectuées Aucune analyse de coûts	Peu ou pas d'utilisation d'un système de gestion - GMAO Utilisation potentielle de systèmes ad hoc	Beaucoup d'arrêts d'équipements Aucune analyse des causes ou tentative d'amélioration pour les réduire	Structure de maintenance en silo avec supervision conventionnelle	Processus non-documentés et inefficaces Nombreux contournement des processus - Non standardisation des façons de faire - Beaucoup de plaintes

ANNEXE III

ÉLÉMENTS D'ÉTUDE DE MARCHÉ POUR LA SOLUTION //m⁴ DE MATRICIS INFORMATIQUE

Tableau A III-1 Marché cible pour la solution //m⁴ de Matricis informatique dans la province de Québec au Canada

Inspirée de <http://www.registreentreprises.gouv.qc.ca/fr/default.aspx>,

(consulté le 25 mars 2014)

Types d'Industries	Brève description
Industries Agricoles	Machineries agricoles
Industries d'alimentation	Industries des aliments- Industries des boissons
Industries d'ameublement	Industries du meuble et des articles d'ameublement
Industries d'exploitation du bois et du papier	Machineries d'exploitation forestière- Industries du bois- Industries du papier et des produits en papier
Industries de l'habillement et accessoires	Industries du cuir et des produits connexes- Industries de l'habillement
Industries Pêche et piégeage	Machineries de Pêche et piégeage
Industries de Transformation des matières	Industries des produits du caoutchouc- Industries des produits en matière plastique- Industries de première transformation des métaux- Industries de la fabrication des produits métalliques
Industries du Pétrole et gaz	Usines d'extraction du pétrole et du gaz naturel- Industries des produits du pétrole et du charbon
Industries de Transports	Industries du matériel de transport- Transports par pipelines- Véhicules de transports
Exploitation du tabac	Industries du tabac
Industries Textiles	Industries textiles de première transformation- Industries des produits textiles
Construction immobilière et génie civil	Installations de Bâtiments et immeubles- Ouvrages de génie civil
Industrie minière	Mines- Carrières et gravières- Industries des produits minéraux non métalliques
Hôpitaux et industrie pharmaceutique	Industries pharmaceutiques- Établissements de santé
Autres industries	Industries de la machinerie (sauf électrique)-Industries des produits électriques et électroniques- Industries chimiques

ANNEXE IV

RÉCAPITULATION DES OUTILS PROPOSÉS POUR RÉMÉDIER AU PROBLÈME DE NON-ADOPTION DE LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE INFONUAGIQUE PAR LES ENTREPRISES

Tableau A IV-1 Adéquation entre problèmes de non-adoption
de la maintenance prédictive infonuagique et
les outils pour y remédier

Problèmes présumés de non-adoption de la maintenance prédictive infonuagique par les entreprises	Propositions d'outils d'explication et d'évaluation pour y remédier
Besoin d'avoir une meilleure connaissance des bonnes pratiques de gestion des actifs physiques	Synthèse des bonnes pratiques de la gestion des actifs suivant PAS55
Besoin d'avoir une bonne connaissance en gestion de la fonction maintenance	Description de la fonction maintenance, politiques et objectifs, aspects économiques et techniques, organisation de la fonction maintenance, etc.
Besoin d'avoir une connaissance approfondie de la maintenance prédictive infonuagique et de son impact sur la gestion des actifs	Description des avantages de la maintenance prédictive infonuagique et ses avantages pour la gestion des actifs (production, santé et sécurité, opérationnel, etc.)
Bien cerner l'impact de la maintenance prédictive infonuagique sur les fonctionnalités de des progiciels de GMAO.	Description des fonctionnalités des GMAO, objectifs des GMAO, apport de la maintenance prédictive infonuagique aux fonctionnalités de GMAO.
Nécessité d'avoir un référentiel fait d'outils d'évaluation, de suivi et d'amélioration des performances de la fonction maintenance au sein de l'entreprise	Conception d'un référentiel technico-économique fait d'indicateurs de performance de maintenance pour évaluer, suivre et améliorer la performance de la fonction maintenance
L'absence d'arguments technico-économiques pouvant permettre au service maintenance en collaboration avec la production de démontrer à la haute direction la rentabilité dans un changement de politique de maintenance	Description du langage et des arguments à tenir face à la haute direction (non technique) et ayant la vision de rentabilité économique tangible.

ANNEXE V

TABLEAUX D'ÉVALUATION MULTICRITÈRE DE LA TROUSSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE CONCUE

Tableau A V-1 Pondération des critères d'évaluation de la trousse

GRILLE D'ÉVALUATION MULTICRITÈRE				
- PONDÉRATION DES CRITÈRES -				
CRITÈRES				POIDS RELATIF (Poids. Max. = 10)
Compréhension des raisons de la non-adoption de la PdM infonuagique par les entreprises	Présentation et explication des avantages de la PdM infonuagique	Démonstration de l'adéquation entre les raisons de l'adoption et la non adoption de la PdM infonuagique et l'explication des avantages de son adoption	Justification de l'implantation de toute solution offrant la PdM infonuagique pour les entreprises	
	1		1	10
				9
1		1		8
				7
				6
				5
				4
				3
				2
				1
				0
8	10	8	10	POIDS RELATIF
				36 (Somme)
0.222 (Poids/Somme)	0.278 (Poids/Somme)	0.222 (Poids/Somme)	0.278 (Poids/Somme)	POIDS NORMALISÉ (somme = 1)

Tableau A V-2 Évaluation des scénarios faisables
(sans la trousse et mémoire de maîtrise)

GRILLE D'ÉVALUATION MULTICRITÈRE				
- ÉVALUATION DES SCÉNARIOS FAISABLES -				
Scénario : Sans Trousse et mémoire de maîtrise				
CRITÈRES				NIVEAU DE PERFORMANCE (Perf. Max. = 10)
Compréhension des raisons de la non-adoption de la PdM infonuagique par les entreprises	Présentation et explication des avantages de la PdM infonuagique	Démonstration de l'adéquation entre les raisons de l'adoption et la non adoption de la PdM infonuagique et l'explication des avantages de son adoption	Justification de l'implantation de toute solution offrant la PdM infonuagique pour les entreprises	
				10
				9
				8
				7
				6
				5
	1		1	4
				3
1		1		2
				1
				0
2	4	2	4	NIVEAU DE PERFORMANCE
X	X	X	X	X
0.222	0.278	0.222	0.278	POIDS NORMALISÉ
=	=	=	=	=
0.444	1.111	0.444	1.111	SCORE
				3.1

Tableau A V-3 Évaluation des scénarios faisables
(avec la trousse et mémoire de maitrise)

GRILLE D'ÉVALUATION MULTICRITÈRE				
- ÉVALUATION DES SCÉNARIOS FAISABLES -				
Scénario : Avec Trousse appuyée par le mémoire de maitrise				
CRITÈRES				NIVEAU DE PERFORMANCE (Perf. Max. = 10)
Compréhension des raisons de la non-adoption de la Pdm infonuagique par les entreprises	Présentation et explication des avantages de la Pdm infonuagique	Démonstration de l'adéquation entre les raisons de l'adoption et la non adoption de la Pdm infonuagique et l'explication des avantages de son adoption	Justification de l'implantation de toute solution offrant la Pdm infonuagique pour les entreprises	
				10
	1		1	9
				8
1		1		7
				6
				5
				4
				3
				2
				1
				0
7	9	7	9	NIVEAU DE PERFORMANCE
X	X	X	X	X
0.222	0.278	0.222	0.278	POIDS NORMALISÉ
=	=	=	=	=
1.556	2.500	1.556	2.500	SCORE
				8.1

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABIresearch. 2014. « Maintenance Analytics to Generate \$24.7 Billion in 2019, Driven by Predictive Maintenance and Internet of Things ». < <https://www.abiresearch.com/press/maintenance-analytics-to-generate-247-billion-in-2> >. Consulté le 25 juillet.
- AFNOR. 1995. *Indicateurs de Maintenance : XP X 60-020*. France: AFNOR, 25 p.
- AFNOR. 2002. *Maintenance industrielle-Fonction maintenance*. FDX 60-000. France: AFNOR, 29 p.
- Albrice, David. 2014. « Key Performance Indicator (KPI) ». < [http://www.assetinsights.net/Glossary/G_Key_Performance_Indicator_\(KPI\).html](http://www.assetinsights.net/Glossary/G_Key_Performance_Indicator_(KPI).html) >. Consulté le 25 mars 2014.
- Association française de normalisation. 1995. *Indicateurs de Maintenance : XP X 60-020*. France: AFNOR, 25 p.
- Barbat, Laurent, Jean-Christophe Blaise, Christophe Bonnaud, Jean-Pierre Caillet, Corinne Grusenmeyer, Jean-Louis Pomian et Olivier Tierno. 2013. *Maintenance: des activités à risques*, 2e éd. Paris, France: INRS, 4 p. < <http://www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.html?refINRS=ED%20123> >. Consulté le 2013.
- Belz, Ludovic. 2010. « Vendre : négociation management ». Présentation PowerPoint. France: ESC de Chambéry - CESNI. < http://www.market-insight.fr/drupal/sites/default/files/cours/Cours_Negociation_-_Vendre.ppt >. Consulté le 30 avril 2014.
- Blaise, Jean-Christophe, et Daniel Liévin. 2008. « Processus de maintenance: Retour d'expérience sur les facteurs de risques ». *Hygiène et Sécurité du Travail*, n° 212, p. 29-41.
- Bo, Sun, Zeng Shengkui, Kang Rui et M. G. Pecht. 2012. « Benefits and challenges of system prognostics ». *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 61, n° 2, p. 323-35.
- Borissova, Daniela, et Ivan Mustakerov. 2013. « A concept of intelligent e-maintenance decision making system ». In *2013 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, IEEE INISTA 2013, June 19, 2013 - June 21, 2013*. (Albena, Bulgaria). Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society. < <http://dx.doi.org/10.1109/INISTA.2013.6577668> >. Consulté le 11 août 2014.
- GE Medical Systems Inc.,. 2005. *Medical Equipment Predictive Maintenance Method and Apparatus*. Brevet américain US 6912481 B2. < <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph->

[Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnethtml%2FPTO%2Fsrchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=6,912,481.PN.&OS=PN/6,912,481&RS=PN/6,912,481](#) >. Consulté le 20 février 2014.

Candrea, Frank, et Mohamed Houari. 2013. « Plant screening for ageing impact in the process industry ». *Chemical Engineering Transactions*, vol. 31, p. 253-258.

COMPTABLE-CRC, COMITE DE LA REGLEMENTATION. 2005. *Règlement n°2004-06 du 23 novembre 2004 relatif à la définition, la comptabilisation et l'évaluation des actifs*. France: Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, 21 p. < http://www.anc.gouv.fr/sections/normes_privées/reglements/reglements_2004/reg2004_06/downloadFile/file/Reg2004_06.pdf?nocache=1318411276.22 >.

Deloux, Estelle, Bruno Castanier et Christophe Berenguer. 2012. « Environmental information adaptive condition-based maintenance policies ». *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 8, n° 4, p. 373-382.

Diallo, C, D Ait-Kadi et A Chelbi. 2008. « An Integrated Approach for Spare Parts Provisioning ». p. 14.

Duhamel, Louis, et Charles-Étienne Daoust. 2013. « Le point sur le Québec manufacturier: Des solutions pour l'avenir ». Québec, Canada: Samson Blair; Deloitte; Touche, 212 p. < http://www.deloitte.com/assets/Dcom-Canada/Local%20Assets/Documents/Manufacturing/ca_fr_mfg_Le_point_sur_le_Québec_manufacturier_09052012.pdf >. Consulté le 10 avril 2014.

Elfezazi, S., A. Moukhlis, R. Benmoussa, M. Hachkar, A. Talbi et D. Bouami. 2003. « Vers un outil, base sur l'analyse fonctionnelle, pour la mise en oeuvre des indicateurs de mesure de performance de la fonction maintenance ». *Revue française de gestion industrielle*, vol. 22, n° 3.

FLIR Systems Inc. 2013. « Qu'est-ce que l'infrarouge? ». < <http://www1.flir.com/infrarouge> >.

Fragnière, Emmanuel, Francesco Moresino, Jean Tuberosa et Nathalie Turin. 2013. *L'étude du marché en pratique: Méthodes et applications*. Belgique: De Boeck, 147 p.

Frédéric, Marc. 2011. *Mettre en oeuvre une GMAO*, 2e. Coll. « Gestion Industrielle ». Paris, France: DUNOD, 461 p.

G. P. Sullivan., R. Pugh., A. P. Melendez. et W. D. Hunt. 2010. « Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency ». 3.0. p. 321. < http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/omguide_complete.pdf >. Consulté le August 2010.

- Galar, D., M. Palo, A. Van Horenbeek et L. Pintelon. 2012. « Integration of disparate data sources to perform maintenance prognosis and optimal decision making ». *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 54, n° 8, p. 440-445.
- Garza-Reyes, J. A., S. Eldridge, K. D. Barber et H. Soriano-Meier. 2010. « Overall equipment effectiveness (OEE) and process capability (PC) measures: a relationship analysis ». *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 27, n° 1, p. 48-62.
- Ghunem, R. A., K. B. Shaban, A. H. El-Hag et K. Assaleh. 2012. « Towards cost-effective maintenance of power transformer by accurately predicting its insulation condition ». In *2012 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 10-12 Oct. 2012*. (London, ON), p. 111-16. Piscataway, NJ, USA: IEEE. < <http://dx.doi.org/10.1109/EPEC.2012.6474933> >. Consulté le 11 août 2014.
- Gitomer, Jeffrey. 2013. *Le petit livre rouge de la vente* (Février 2013), 4e éd. Montreal, Canada: Les éditions Transcontinental, 224 p.
- Groupe Creatests. 2014. « Les étapes d'une étude de marché ». < <http://www.creatests.com/les-etapes-de-l-etude-de-marche> >. Consulté le 14 Juillet.
- Heng, Aiwina, Andy C. C. Tan, Joseph Mathew, Neil Montgomery, Dragan Banjevic et Andrew K. S. Jardine. 2009. « Intelligent condition-based prediction of machinery reliability ». *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, n° 5, p. 1600-1614.
- Hopkins, Tom. 1987. *La vente* (167), 2e éd. Montreal, Québec: Les éditions de L'Homme, 637 p.
- Institute of Asset Management., et BSI. 2008. *Asset management. Part 2, Guidelines for the application of PAS 55-1* Coll. « Publicly available specification ; PAS 55-2:2008 ». London, Royaume-Uni: London, Royaume-Uni : British Standards Institution 56 p.
- ISO. 2013. « Normes de systèmes de management ». < <http://www.iso.org/iso/fr/home/standards/management-standards.htm> >.
- Jantunen, Erkki, Christos Emmanouilidis, Aitor Arnaiz et Eduardo Gilabert. 2011. « E-Maintenance: Trends, challenges and opportunities for modern industry ». In *18th IFAC World Congress, August 28, 2011 - September 2, 2011*. (Milano, Italy), PART 1 Vol. 18, p. 453-458. Coll. « IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) »: IFAC Secretariat. < <http://dx.doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02824> >.
- Kenneth Piety, et David Geswein. 2011. *Cloud Computing - Another Buzzword or Leveraging Technology?* USA: AZIMA DLI, 9 p.

- Laut, D., J. Liu, S. Majumdar, B. Nandy, M. St-Hilaire et C. S. Yang. 2013. « A cloud-based approach for smart facilities management ». In *2013 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, PHM 2013, June 24, 2013 - June 27, 2013*. (Gaithersburg, MD, United states). IEEE Computer Society. < <http://dx.doi.org/10.1109/ICPHM.2013.6621459> >. Consulté le 11 août 2014.
- Lee J., Yang S., Lapira E., Kao H.A. et Yen N. 2013. « Methodology and Framework of a Cloud-Based Prognostics and Health Management System for Manufacturing Industry ». *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTION- AIDIC*, vol. 33, n° 2013, p. 6.
- Lee, J., M. Ghaffari et S. Elmeligy. 2011. « Self-maintenance and engineering immune systems: Towards smarter machines and manufacturing systems ». *Annual Reviews in Control*, vol. 35, n° 1, p. 111-122.
- Lee, J., et L. W. Scott. 2006. « Zero-breakdown machines and systems: Productivity needs for next-generation maintenance ». In *Proceedings of the 1st World Congress on Engineering Asset Management, WCEAM 2006, July 11, 2006 - July 14, 2006*. (Gold Coast, QLD, Australia), p. 31-43. United Kingdom: Springer-Verlag London Ltd.
- Lee, Jay, Shanhu Yang, Edzel Lapira, Hung-An Kao et Nelson Yen. 2013. « Methodology and Framework of a Cloud-based Prognostics and Health Management System for Manufacturing Industry ». *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 33, p. 6. < <http://www.aidic.it/cet/13/33/035.pdf> >. Consulté le 10 septembre 2013.
- Li, Changyou, Yimin Zhang et Minqiang Xu. 2012. « Reliability-based Maintenance Optimization under Imperfect Predictive Maintenance ». *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 25, n° 1, p. 160-5.
- Macchi, Marco, et Marco Garetti. 2006. « Information requirements for e-maintenance strategic planning: A benchmark study in complex production systems ». *Computers in Industry*, vol. 57, n° 6, p. 581-594.
- Macke, Michael, et Shoko Higuchi. 2007. « Optimizing maintenance interventions for deteriorating structures using cost-benefit criteria ». *Journal of Structural Engineering*, vol. 133, n° 7, p. 925-934.
- Manufacturiers et Exportateurs du Québec. 2007. *Maintenance et Fiabilité: 58 indicateurs pour améliorer votre performance*, 1ere éd. Montréal, Québec, Canada: MEQ: Manufacturiers et Exportateurs du Québec, 128 p.
- Mell, Peter, et Timothy Grance. 2011. *The NIST Definition of Cloud Computing : Recommendations of the National Institute of Standards and Technology*. Coll. « Special publication », 800-145. Gaithersburg, Maryland State, U.S: National Institute of Standards and Technology (NIST), 7 p. <

<http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-145/SP800-145.pdf> >. Consulté le 14 juillet 2014.

Menzel, Michael, Marten Schönherr et Stefan Tai. 2013. « (MC2) 2: criteria, requirements and a software prototype for Cloud infrastructure decisions ». *Software: Practice and experience*, vol. 43, n° 11, p. 1283-1297.

Monchy, F., et Jean-Pierre Vernier. 2010. *Maintenance- Méthodes et Organisation*, 3e. Paris-France: DUNOD, 533 p. < <http://userhome.free.fr/ebook/Maintenance%20-%20methodes%20organisations.pdf> >.

Mouzoune, Abdessamad, et Saoudi Taibi. 2013. « Towards an intelligence based conceptual framework for e-maintenance ». In *2013 8th International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications, SITA 2013, May 8, 2013 - May 9, 2013*. (Rabat, Morocco). Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society. < <http://dx.doi.org/10.1109/SITA.2013.6560789> >. Consulté le 11 août 2014.

Oliveira, Allan C. M., Regina B. Araujo et Andrew K. S. Jardine. 2013. « A human centered view on E-maintenance ». *Chemical Engineering Transactions*, vol. 33, p. 385-390.

Organisation internationale de normalisation. 2000. *Systèmes de Management de la qualité- Principes essentiels et vocabulaire*, 2e éd. Coll. « Norme internationale ISO », ISO-9000:2000. Genève: Organisation internationale de normalisation, 38 p.

Organisation mondiale de la santé. 2012. *Introduction à la gestion du parc des équipements médicaux*. Séries techniques. Coll. « Série technique de l'OMS sur les dispositifs médicaux ». Genève- Suisse: OMS, 361 p. < http://whqlibdoc.who.int/publications/2012/9789242501391_fre.pdf >. Consulté le 15 juillet 2014.

Ottawa, City of. 2012. *Programme de gestion intégrale des actifs: bilan des actifs 2012*. Ottawa, Canada: Ville d'Ottawa, 32 p. < http://ottawa.ca/sites/ottawa.ca/files/2012_soar_fr.pdf >.

Ouellet, Rejean. 2013. « Solution novatrice pour rentabiliser vos actifs en passant par la maintenance conditionnelle ». In. (Centre de Recherche en Informatique de Montréal (CRIM), Montreal, 2013), p. 31. Matricis. Consulté le 02 juin 2013.

Prouty, Kevin, et Reid Paquin. 2013. *Asset Management: Using Analytics to Drive Predictive Maintenance*. mars 2013, 10 p. < www.aberdeen.com >.

Qikai, Zhuang, T. E. Van der Lei, D. Djairam et J. J. Smit. 2011. « Interdependencies at the strategic asset management level: a systems analysis of the utility sector ». In *2011 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2011), 11-13 April 2011*. (Piscataway, NJ, USA), p. 365-70. Coll. « 2011 International Conference

on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2011) »: IEEE. < <http://dx.doi.org/10.1109/ICNSC.2011.5874927> >.

Québec, MEQ: Manufacturiers et Exportateurs du (Ed). 2007. *Maintenance et Fiabilité: 58 indicateurs pour améliorer votre performance* (2007), 1ere. Montréal, Québec, Canada: MEQ: Manufacturiers et Exportateurs du Québec, 128 p. Consulté le Janvier 2014.

Ravishankar, G., C. Burczak et R. De Vore. 1992. « Competitive manufacturing through total productive maintenance ». *IEEE/SEMI International Semiconductor Manufacturing Science Symposium, 15-16 June 1992*, p. 85-9.

Stevenson, William J., Claudio Benetti et Youssef Abdou Youssef. 2012. *La Gestion des Opérations: Produits et Services*, 3e éd. Montreal, Québec, Canada: Chenelière-McGraw-Hill, 784 p.

Tsang, Albert H. C., W. K. Yeung, Andrew K. S. Jardine et Bartholomew P. K. Leung. 2006. « Data management for CBM optimization ». *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 12, n° 1, p. 37-51.

Vasse, Francis. 2014. « Le marché de la GMAO ». Association Francaise des ingénieurs et responsables de maintenance. < <http://www.afim.asso.fr/actifs/gmao/gmao-marche.asp> >. Consulté le 20 Janvier 2014.

Verma, Nishchal K., et T. S. S. Subramanian. 2012. « Cost benefit analysis of intelligent condition based maintenance of rotating machinery ». In *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2012, July 18, 2012 - July 20, 2012*. (Singapore, Singapore), p. 1390-1394. Coll. « Proceedings of the 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2012 »: IEEE Computer Society. < <http://dx.doi.org/10.1109/ICIEA.2012.6360940> >.

Wakjira, Melesse Workneh, et Ajit Pal Singh. 2012. « Total Productive Maintenance: A Case Study in Manufacturing Industry ». vol. 12, n° 1, p. 9.

William J. Stevenson., Claudio Benedetti. et Youssef Abdou Youssef. 2012. *La gestion des opérations : produits et services* (2012), 3e. Montréal , Québec: Chenelière-McGraw-Hill 784 p.

Wu, Zhipeng, et Aiping Gan. 2011. « Qualitative and quantitative analysis the value of cloud computing ». In *4th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2011, November 26, 2011 - November 27, 2011*. (Shenzhen, China) Vol. 2, p. 518-521. IEEE Computer Society. < <http://dx.doi.org/10.1109/ICIII.2011.270> >. Consulté le 11 août 2014.

- Zaeri, M. S., J. Shahrabi, M. Pariazar et Arash Morabbi. 2007. « A combined multivariate technique and multi criteria decision making to maintenance strategy selection ». In *2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2007, December 2, 2007 - December 4, 2007*. (Singapore), p. 621-625. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society. < <http://dx.doi.org/10.1109/IEEM.2007.4419264> >. Consulté le 11 août 2014.
- Zhang, Qian. 2013. « Case study of cost benefits of condition based maintenance used in medical devices ». In *2013 Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), January 28, 2013 - January 31, 2013*. (Orlando, FL, United states). Coll. « Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium ». Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. < <http://dx.doi.org/10.1109/RAMS.2013.6517676> >. Consulté le 11 août 2014.
- Zhipeng, Wu, et Gan Aiping. 2011. « Qualitative and Quantitative Analysis the Value of Cloud Computing ». In *2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII), 26-27 Nov. 2011*. (Piscataway, NJ, USA) Vol. vol.2, p. 518-21. Coll. « Proceedings 2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII) »: IEEE. < <http://dx.doi.org/10.1109/ICIII.2011.270> >.