
Evolution des systèmes de maintenance et enjeux des systèmes du futur

- 1. Introduction7
- 2. Processus de maintenance9
- 3. Les nouveaux besoins et enjeux des systèmes intelligents de maintenance10
 - 3.1- Les nouveaux besoins de maintenance10
 - 3.2- La gestion des connaissances12
 - 3.3- Les fonctionnalités autonomes (self-X)13
- 4. Les générations des systèmes de Maintenance14
 - 4.1- Classification des générations de systèmes15
 - 4.2- Caractérisation des systèmes de maintenance20
- 5. La e-maintenance21
 - 5.1- Les définitions de la e-maintenance21
 - 5.2- Limites de la e-maintenance25
- 6. La s-maintenance : réponse aux nouveaux enjeux de la maintenance26
 - 6.1- La définition du concept de s-maintenance27
 - 6.2- Définition des fonctionnalités d’auto apprentissage et d’autogestion28
 - 6.3- Définition d’une plateforme de s-maintenance28
- 7. Conclusion30

1. Introduction

Au cours des vingt dernières années, le rôle de la maintenance dans les entreprises est devenu de plus en plus important aussi bien sur le plan technologique que sur le plan économique. Elle s'inscrit dans une logique de développement durable et permet d'augmenter la disponibilité des systèmes industriels d'une part et d'allonger leur cycle de vie d'autre part. De plus, l'anticipation des défaillances sur les éléments critiques de systèmes, grâce à la maintenance prévisionnelle (le pronostic) (Muller A. , 2005) permet de prévenir les risques industriels (nucléaire, plateforme pétrolière...) et d'assurer la sécurité des personnes et des biens. Enfin, la mise en œuvre de la maintenance nécessite une qualification et participe à la valorisation du personnel technique de maintenance. Ce processus de maintenance sera plus détaillé dans la section 2.

Par ailleurs, le développement des systèmes informatiques d'aide à la gestion de la maintenance industrielle a commencé lorsque la maintenance a été reconnue comme fonction fondamentale dans l'entreprise et un accent particulier a été mis sur le développement des procédures de cette fonction. L'industrie a vu l'évolution de différentes générations de systèmes de maintenance passant d'un système de maintenance local au système de GMAO (Gestion de la Maintenance Assisté par Ordinateur) et arrivant à une plateforme de e-maintenance.

En effet, la tendance actuelle des entreprises à se recentrer sur leur corps de métier en externalisant tout ou en partie, la fonction de maintenance, combinée aux avancées dans le domaine technique et aux nouvelles technologies de l'information et de la communication ont induit une évolution des systèmes de maintenance vers des systèmes intégrateurs de modules intelligents, communiquant et collaborant entre eux.

Ces différents systèmes fournissent à ses utilisateurs (les différents acteurs de la maintenance) un ensemble de service permettant une gestion informatisée d'un ensemble d'activités de base appartenant au processus de maintenance (exemple l'intervention, la planification, le diagnostic, etc.). Ils fournissent ainsi un support d'aide à la décision par un ensemble d'indicateurs prédéfinis sur les coûts, les interventions et les équipements.

Les besoins des utilisateurs évoluent dans le temps en fonction de nouvelles contraintes ou de l'expertise de ceux-ci, et les services fournis par ces systèmes d'aide ne sont plus en concordance et nécessite une réactualisation.

Quoique, les services et les indicateurs fournis par de tels systèmes répondent à un moment donné aux attentes et besoins de l'utilisateur, ces services peuvent être insuffisants à un autre moment ou d'autres besoins.

Soit l'exemple d'un expert de maintenance utilisant un système de GMAO qui fournit le MTBF¹ et MTTR² comme indicateurs. Le directeur de l'entreprise étudie une possibilité d'investir dans des nouveaux équipements et a besoin d'obtenir des informations sur le rendement et l'efficacité des équipements possédés. Pour répondre à cette requête, l'expert a besoin de l'indicateur TRG³ (Taux de rendement global), mais le système de GMAO qu'il possède ne fournit pas cet indicateur. Dans ce cas, il doit fouiller la base de données manuellement,

¹ *Mean Time Between Failures (MTBF)*: Le temps moyen entre pannes

² *Mean Time To Repair (MTTR)*: temps moyen pour réparer,

³ *TRG*: indicateur sur les performances des machines qui utilise le temps des arrêts des machines comme paramètres. Ce facteur est le rapport entre le temps de fonctionnement de la machine et la durée de vie de la machine.

chercher les facteurs de temps de l'historique s'il peut les localiser dans la base de données et faire les calculs à la main en se référant à tous les types d'arrêts.

La réactualisation doit se faire manuellement, ou être intégrée dans le service fournissant les indicateurs, soit en faisant redévelopper ce service par un informaticien qui intégrera ce nouvel indicateur, soit en achetant une nouvelle version de GMAO si elle existe, ou dans le cas d'une plateforme de e-maintenance intégratrice de services, intégrer un service au calcul de cet indicateur. Les services et les indicateurs fournis par ces systèmes ne sont pas dynamiques et n'évoluent pas au fur et à mesure de manière automatique avec les besoins des utilisateurs. L'idéal serait d'avoir un service à la demande de calcul d'indicateurs qui suivrait l'évolution des besoins.

Dans un autre registre, quand l'utilisateur a acquis une nouvelle expertise sur l'équipement grâce aux nouvelles réparations faites, il est frustrant de ne pas pouvoir réutiliser cette expertise dans le système d'aide, qui ne s'est pas remis à jour, faute de réactualisation. En effet, l'utilisateur une fois la réparation effectuée omet d'intégrer ces informations dans le système d'aide, quand celui-ci le lui permet. Les autres utilisateurs ne peuvent donc pas bénéficier de cette expérience. La capitalisation des connaissances n'est pas effective, et devrait s'effectuer automatiquement en minimisant l'impact utilisateurs. Il serait intéressant d'avoir un service de retour d'expérience apprenant par lui-même, d'avoir des traces de toute opération ou événement se déroulant dans le système d'aide et les rendre disponibles à l'utilisateur d'une manière ergonomique, et les exploiter pour développer des services se remettant à jour par eux même.

Sur la base de ces deux exemples simples, on peut constater que ces systèmes actuels d'aide à la maintenance ne satisfont pas toujours les attentes des acteurs de maintenance. Insatisfaction due à l'absence d'évolution automatique de l'intelligence des services qui ne s'adaptent pas aux besoins des utilisateurs.

Les limites des systèmes de maintenance, par rapport aux besoins des utilisateurs nous amènent à étudier les différents aspects que doit présenter la future maintenance. La section 3 prend appui sur les travaux de IMS-Center sur la future maintenance et le projet avant-gardiste TATEM pour définir les caractéristiques des ces systèmes de maintenance.

Par rapport à ces enjeux, la section 4 évaluera les générations de systèmes de maintenance selon leurs caractéristiques pour identifier à quels besoins ils répondent, leurs limites et pourquoi ils ne répondent pas aux attentes évolutives des utilisateurs.

On fera apparaître une cinquième génération initialement proposée par Rasovska (Rasovska I. , 2006) et devant résoudre le problème d'interopérabilité sémantique d'une plateforme de e-maintenance.

Nous étudions une nouvelle génération de système faisant l'objet de travaux de recherche actuels dans le domaine ayant comme objectif de répondre aux enjeux identifiés. Nous consacrerons donc la suite de ce chapitre à une proposition d'évolution entre le concept de e-maintenance (présentant la dernière génération de système actuel) vers le concept de s-maintenance répondant aux enjeux de demain et formant la nouvelle génération. Afin de mieux expliquer ce passage entre générations, la section 5 sera consacrée à étudier le concept de e-

maintenance, et à proposer une définition fédérant les travaux dans le domaine. La section 6 sera consacrée à la définition du concept de s-maintenance basée sur un système d'information orienté connaissance.

2. Processus de maintenance

Les normes NF X 60-010 et 60 011 définissent la maintenance comme l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien (*Asset*) dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Dans cette définition, nous trouvons deux mots-clés à savoir maintenir et rétablir, qui font référence aux différents types de maintenance dont nous rappelons les définitions dans l'*annexe 1 : types de maintenance*. Le premier mot clé a trait à une action préventive, que la prévention soit systématique conditionnelle ou prévisionnelle tandis que le deuxième est lié à l'aspect correctif.

Une autre définition en concordance avec la première définition est fournie par le ministère du Commerce et de l'Industrie (DTI) Britannique, présentant la maintenance comme « la gestion, le contrôle, l'exécution et la qualité des activités qui feront en sorte que les niveaux optimaux de la disponibilité et la performance globale d'un bien sont atteints, afin de répondre aux objectifs de l'entreprise » (Labib, 2006).

Ainsi, la norme AFNOR définit la maintenance comme « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».

La Figure 1-1 issue de Retour et al. présente la fonction maintenance comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion (Retour, Bouche, & Plauchu, 1990).

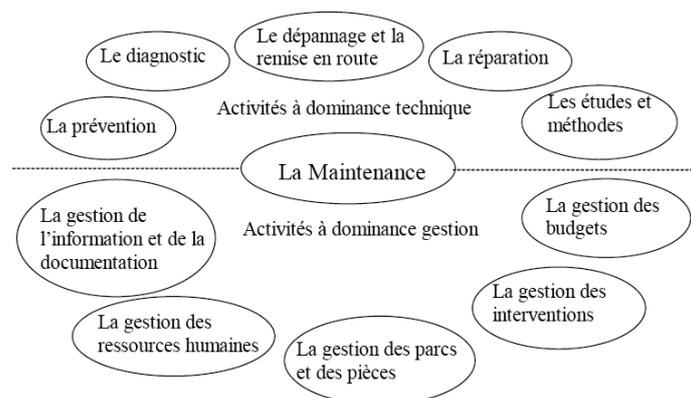


Figure 1-1 La fonction maintenance (Retour, Bouche, & Plauchu, 1990)

Afin de proposer un système de gestion et d'aide à la maintenance, Rasovska et al (Rasovska, Morello-Chebel, & Zerhouni, 2007) partant de ces définitions et du processus de maintenance⁴ ont identifiés quatre principaux domaines, deux techniques et deux de gestion dont les activités s'emboîtent les unes dans les autres, et qui catégorisent toutes les tâches du processus global de maintenance (voir Figure 1-2).

⁴ Un processus de maintenance selon (Spadoni, 2004) est un enchaînement d'activités contrôlées ou interactives.



Figure 1-2 Les différentes couches du processus de maintenance

Les deux premières couches dédiées au domaine technique, comportent :

- L'analyse de l'équipement, domaine qui englobe le recensement des données et information ainsi que les différentes analyses de l'équipement (structurelle, fonctionnelle/ dysfonctionnelle, événementielle etc.), les connaissances concernant le plan de l'expertise associé.
- Les applications de surveillance, de détection de défaillance, de diagnostic de pannes, de pronostic des dégradations et d'aide à la décision concernant des mesures de réparation, et de maintien en conditions opérationnelles.

Les deux couches suivantes traitent de la gestion des ressources et des stratégies de maintenance (contrats). Ces deux couches utilisent des indicateurs techniques et financiers. Ces indicateurs proviennent des rapports d'intervention édités dans les phases de diagnostic de panne et de réparation, mais gérés dans la phase de gestion des interventions, phase faisant partie de la gestion des ressources. La première couche permet de gérer les ressources humaines et matérielles, les plans des interventions de maintenance préventive et le stockage avec des pièces de rechange, des outils utilisés pour les interventions.

La couche de gestion des stratégies de maintenance et de contrat gère les décisions concernant la stratégie générale de maintenance appliquée dans un parc de machines, et la gestion des contrats.

Maints travaux développent un aspect ou quelques aspects concernant la maintenance, soit les deux premières couches dans les travaux sur le CBM (Tsang A. H., 1995) soit la troisième couche sur la gestion des ressources humaines (Shenoy & Bhadury, 1998). Nous considérons comme Karim et al (Karim, Kajko-Mattsson, & Söderholm, 2008) que le processus de maintenance doit être pris en considération dans son ensemble, y compris dans ses phases de gestion, de planification, de préparation, d'exécution, sans oublier l'évaluation et l'amélioration pour fournir aux opérateurs un système complet d'aide à la maintenance.

3. Les nouveaux besoins et enjeux des systèmes intelligents de maintenance

3.1- Les nouveaux besoins de maintenance

La maintenance de nos jours combinée avec les pertes en coûts et en temps imposent une plus grande efficacité au processus de maintenance dans les entreprises. Par conséquent, les nouveaux systèmes de maintenance doivent prendre ceci en considération et fournir une valeur ajoutée dans le but d'améliorer cette efficacité et de faire évoluer le rôle de la maintenance. A ces fins, le besoin de mettre en place de plus en plus de services intelligents s'est imposé pour répondre à ces exigences ; Services d'aides à la décision pour la réutilisation des composants dans le but de diminuer les coûts, Services de retour d'expérience pour améliorer les activités d'expertises, de diagnostic, d'intervention, ainsi que d'autres services intelligents.

Ainsi, Lee identifie les services nécessaires pour demain comme (Lee, Liao, Lapira, Ni, & Li, 2009):

- un système orienté client (Customer-Intensive System) dans lequel les utilisateurs bénéficiaires des résultats du système participent au processus d'élaboration du système en fournissant les entrées nécessaire pour cette élaboration. (Pinhanez, 2008).
- un système instrumenté (Smart Agent),
- un système d'analyse intelligente,
- un système de gestion des connaissances métier,
- un système orienté clients pour éviter d'éventuels problèmes.

Ainsi, ce que nous constatons en étudiant les travaux actuels en maintenance qu'on a besoin de plus de fonctionnalités à valeur ajoutée, comme les services de prédiction temporelle telles que des fonctions d'anticipation de dégradation, des services à la demande édités par l'utilisateur exprimant ses besoins (les services d'aide à la décision) et ceux basés sur l'utilisation (c.à.d. le retour d'expérience).

Le centre IMS a fourni un schéma des besoins communs non satisfaits pour les futurs services de maintenance [*“Common Unmet Needs in Future Maintenance and Service”*] (voir Figure 1-3).

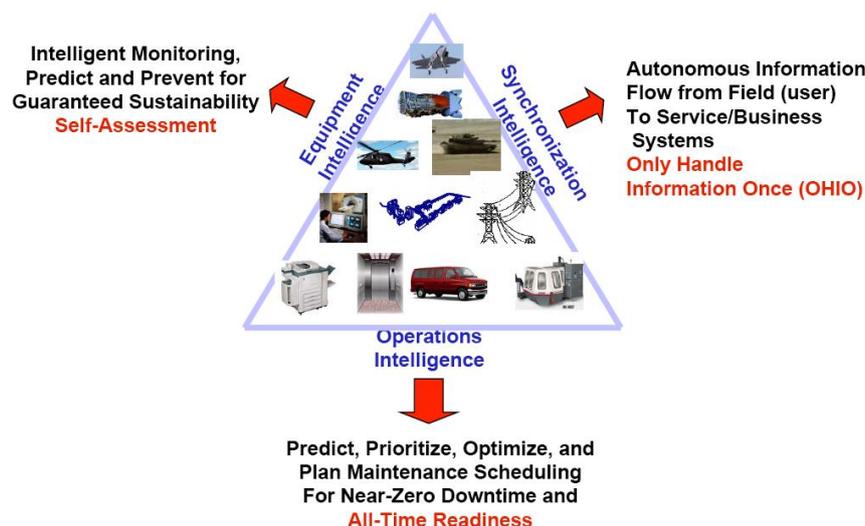


Figure 1-3 CuNeMas : Common Unmet Needs in Future Maintenance and Service (Lee, Liao, Lapira, Ni, & Li, 2009)

La Figure 1.3 présente 3 axes sur l'intelligence (mot clé des services de demain) qui se recoupent en triangle ; intelligence appliquée à l'équipement, aux opérations de maintenance et à l'information et sa synchronisation.

Un des projets avant-gardistes de maintenance, le projet international TATEM (Technologies and Techniques for New Maintenance Concepts) définit l'architecture d'une approche de gestion de maintenance intégrée pour la santé des avions. Son objectif est d'élaborer et de valider des philosophies, des technologies et des techniques, qui peuvent être utilisées pour transférer des activités de maintenance imprévues à des activités de maintenance prévisibles.

TATEM a une vision holistique⁵ de la maintenance des avions en étudiant tous les aspects des avions et les problèmes de maintenance. Le projet identifie les différents aspects philosophiques, technologiques et techniques de la future maintenance suivants (GE-Aviation, 2007) :

- Les techniques de traitement du signal (basées sur des modèles de raisonnement, de la logique floue, de réseaux neuronaux,.) qui peuvent être utilisées pour convertir les données en informations sur la santé des systèmes.
- Les méthodes de diagnostic et de pronostic pour identifier, localiser et anticiper les pannes et les dysfonctionnements et ainsi de réduire l'incidence des fausses alarmes.
- Les nouvelles technologies des capteurs à bord pour recueillir des données de l'avion et ainsi alimenter les systèmes de pronostic ou de diagnostic.
- Les technologies d'interface homme-machine afin de fournir aux acteurs de maintenance les informations, les données et les conseils sur le point de travail.
- Les processus de maintenance qui ne nécessitent aucun travail de maintenance programmée.
- Les techniques d'aide à la décision pour générer des processus orientés information et guider les acteurs de maintenance.

Finalement, nous constatons qu'une forte concordance entre les besoins identifiés par TATEM et les services recommandés par Lee corrobore les enjeux mis en place par Jay Lee. L'objectif commun qui unit ces propositions relatives aux systèmes de maintenance est une efficacité plus élevée du processus de maintenance à travers une meilleure exploitation des connaissances métier et des technologies intelligentes, ce qui induit une réduction des pertes en coûts et en temps.

3.2- La gestion des connaissances

Lee définit la maintenance du future comme: « La bonne information aux bonnes personnes pour faire les bonnes choses au bon moment », définition correspondant au problème de capitalisation des connaissances (Matta, Ermine, Aubertin, & Trivin, 2001). En effet de nombreux travaux sur la connaissance sont développés dans un grand nombre de recherche à savoir les systèmes d'information, le Web Intelligent, les méthodes de retour d'expérience, etc. (Rezgui, Boddy, & Wetherill, 2009) (Mrissa, Benslimane, Ghedira, & Maamar, 2005). La maintenance est un de ces domaines où les connaissances sont développées, que ce soit par une connaissance

⁵ Globaliste : qui relève de l'holisme, considérant l'objet comme constituant d'un tout.

formelle ou sous forme de règles de décision extraites à partir des données. On peut identifier les travaux sur la connaissance dans les besoins CuNeMas au niveau de l'axe synchronisation de l'information intelligente.

Concernant la connaissance, l'entreprise a pris conscience de l'importance de son capital intangible à savoir l'activité intellectuelle, la connaissance le savoir en son sein. Stuart en 1996 a dit que notre société transite de l'économie industrielle à l'économie fondée sur une activité de connaissance (Stuart, 1996). La gestion des connaissances devient donc un enjeu stratégique lié à la croissance économique et le moteur de la productivité. Elle répond au nouveau défi de l'environnement concurrentiel : la gestion des connaissances tente de lier la vision classique de production à ces nouveaux besoins.

La gestion des connaissances (KM) a été définie par Grundstein (Grundstein, 2002) comme la gestion du processus de création, de partage, de stockage, de réutilisation et de capitalisation de connaissances, ainsi que ses activités connexes. Aujourd'hui, la connaissance est de plus en plus considérée comme l'atout le plus important des organisations et des entreprises, en particulier dans le secteur des services des industries basé sur la connaissance. Ces connaissances, expériences et savoir-faire des entreprises sont stockées et capitalisées pour tirer profit afin de créer un capital intellectuel défini comme «la somme accumulée ainsi que la valeur des connaissances et de l'expertise partageables de l'entreprise» (Moradi & Vallespir, 2010). Selon la définition ci-dessus, pour que ces connaissances deviennent un capital intellectuel, elles doivent être partagées.

Dans le cadre de la maintenance, Rasovska et al (Rasovska, Morello-Chebel, & Zerhouni, 2007) (Rasovska, Chebel-Morello, & Zerhouni, A mix method of knowledge capitalization in maintenance, 2008) ont construit une mémoire d'entreprise de maintenance grâce au processus de capitalisation des connaissances. Par «mémoire d'entreprise», on entend «un ensemble structuré de connaissances liées à l'expérience de l'entreprise dans un domaine donné». La connaissance doit être identifiée, formalisée et modélisée pour être récupérée, réutilisée et mise à jour par les employés de l'entreprise (Kobbacy & Jeon, 2001).

Dans le même champ d'application, les travaux liés à la maintenance présentés par Labib sur l'auto-maintenance (Labib, 2006) sont basés sur des méthodes d'extraction et de gestion des connaissances en utilisant des systèmes intelligents à base de règles; des systèmes de raisonnement à partir de cas et / ou d'intelligence artificielle à base d'inférence neuro-flou.

3.3- Les fonctionnalités autonomes (self-X)

Ces dernières années, un grand nombre de recherches a été effectué en essayant d'explorer de nouvelles méthodes concernant la gestion des systèmes logiciels complexes (Weiss, Zeller, & Eilers, 2011). Ces recherches ont clairement souligné que la durabilité des systèmes nécessite des niveaux élevés d'autonomie et d'adaptabilité des systèmes (Onori, Semere, & Lindberg, 2011).

En 2001, IBM a introduit le paradigme de « Autonomic Computing (AC) » (Horn, 2001). L'idée principale de ce paradigme est l'adaptation du comportement d'un système complexe qui interagit de manière autonome. La gestion des éléments autonomes est réalisée par un cycle de reconfiguration où chaque élément autonome surveille et analyse l'environnement, les plans de ses prochaines étapes et exécute les actions qui en résulte.

Ainsi, le principe de ce type de système autonome évolutif ne réside pas seulement dans la capacité des composantes du système à s'adapter à l'évolution des conditions de fonctionnement mais aussi à aider à l'évolution de ces composants dans le temps. Ce qui permet ainsi aux processus de devenir auto-X, où le X indique un ou plusieurs fonctionnalités souhaitables d'un système soumis à un état de fonctionnement variables.

Ces fonctionnalités auto-x (comme auto-adaptation, auto-organisation, auto-configuration, d'auto-guérison, d'auto-apprentissage, autogestion, autoprotection et auto-optimisation (Kephart & Chess, 2003)) améliorent l'intelligence, l'évolutivité, la robustesse et la flexibilité du système. Typiquement, les systèmes évolutifs sont composés de modules intégrés intelligents assurant ces propriétés.

Comme le montre la Figure 1-4 que nous adaptons de (Garlan & Schmerl, 2002) et (Weiss, Zeller, & Eilers, 2011), un système assurant des fonctionnalités d'auto-X fonctionne suivant une boucle fermée basée sur son système de gestion de connaissances où chaque étape de cette boucle peut faire état d'une ou plusieurs des propriétés d'auto-X.

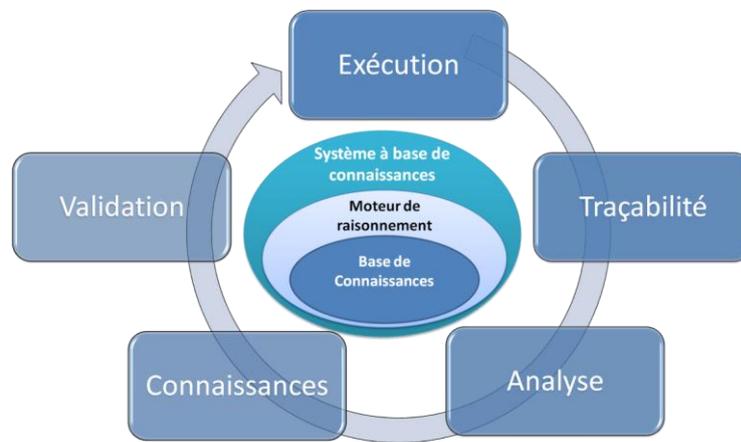


Figure 1-4 Boucle fermée des services auto-X

Nous présenterons dans la prochaine section une analyse des différents systèmes de maintenance d'hier à aujourd'hui afin de pouvoir dégager des spécificités susceptibles de répondre à ces nouveaux enjeux.

4. Les générations des systèmes de Maintenance

4.1- Classification des générations de systèmes

Nous consacrons ce paragraphe à étudier le passé, le présent et l'avenir des systèmes de maintenance. Prenant appui sur l'histoire du développement et de la prévision de la tendance de développement des technologies de maintenance (voir Figure 1-5).

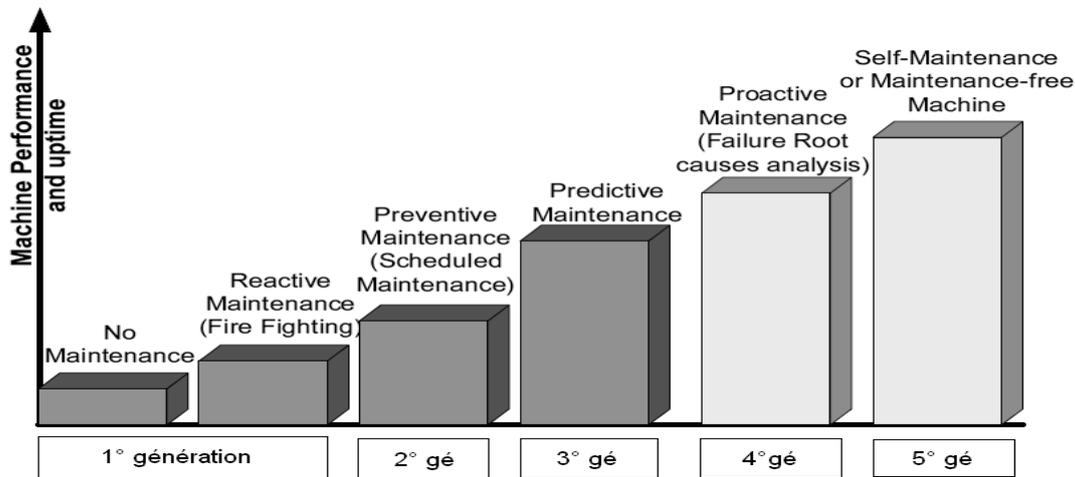


Figure 1-5 Le développement des technologies de maintenance (Lee & Wang, 2008)

Nous constatons qu'il y a une relation de correspondance entre les types de maintenance existants : la maintenance réactive, préventive systématique, prédictive, proactive et la maintenance de demain « l'auto-maintenance » et les systèmes informatiques de maintenance fournissant les services requis par chaque type de maintenance. Sur la base de cette correspondance nous classifions l'évolution des systèmes de maintenance.

Prenant appui sur l'étude faite par Rasovka sur l'évolution des systèmes (Rasovska, Morello-Chebel, & Zerhouni, 2007) et les travaux de Lee (Lee & Wang, 2008), nous définissons cinq générations de systèmes allant d'un système manuel vers les systèmes de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO), les Entreprise Ressource Planning (ERP) et les systèmes intégrant divers types d'application comme les plateformes e-maintenance. La dernière génération de ces systèmes alliant les nouveaux besoins, et l'évolution de la technologie de 4° génération concerne les plateformes de s-maintenance intégrant la connaissance dans le cœur de la plateforme, 5° génération qui fait l'objet de cette thèse.

Le tableau 1 caractérise ces générations selon sept critères ; le système informatique de maintenance existant réalisant le type de maintenance, le degré d'informatisation de la maintenance, et les 4 domaines d'application définis au paragraphe 2 à savoir les techniques d'analyse de l'équipement, les technologies de monitoring de l'équipement, les ressources gérer et finalement les stratégies et politiques de maintenance)

La première génération ne s'intéresse qu'à la réparation de l'équipement qui tombe en panne. Il n'y a pas de véritable politique de maintenance permettant d'anticiper toute défaillance.

La deuxième génération a vu l'informatisation des procédures de maintenance, en passant par le développement de fichiers informatiques recensant l'ensemble des équipements, des opérations de maintenance, des plans et des schémas, inventoriant les stocks d'outils et de pièces de rechange, etc. L'intégration de ces fichiers et l'automatisation des activités de maintenance deviennent donc possibles et peuvent être réalisées grâce au système de GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur). Les événements de maintenance ont été recensés : la défaillance, la maintenance préventive et la gestion des stocks.

En effet une GMAO est un outil informatique permettant de gérer les ordres d'intervention et contrôler de manière efficace l'inventaire et les données correspondantes. Cet outil inclut les trois tâches de base de gestion de la maintenance, à savoir les tâches essentielles comme la planification et l'ordonnancement, le contrôle, l'exécution des interventions et le suivi, les tâches administratives telles que la gestion de projet et enfin la gestion des données concernant les plans de travail, les documents techniques et les matériaux, etc (Hoeck, H. et al. 2002).

La troisième génération représente une nouvelle étape dans la rationalisation des processus métiers et dans l'intégration de la maintenance avec d'autres fonctions de l'entreprise. Le logiciel de maintenance devait être connecté à d'autres progiciels de gestion intégrée de l'entreprise comme par exemple l'ERP (Enterprise Resource Planning).

De plus, l'émergence des techniques d'analyses modernes telles que l'analyse vibratoire, l'analyse de viscosité, thermographie inférée, couplées à des systèmes experts ont été décrites sous le sigle TTAO (Travaux Techniques Assistés par Ordinateur) ou TMAO (Techniques de Maintenance Assistées par Ordinateur). Ces systèmes d'analyse sont également destinés à fournir le support décisionnel dans le diagnostic, le pronostic et les opérateurs qui effectuent la réparation des équipements, etc. (Rasovska I. , 2006).

Dans la même veine, des systèmes d'acquisition et de contrôle (SCADA), ainsi que les systèmes de stockage de données (entrepôt de données data mining) et de contrôle ont été développés ainsi que des systèmes de gestion des données techniques et de documentation, etc.

Une série de projets a été lancée pour relier les applications dédiées à un type de maintenance par exemple (ICAS : Integrated Condition Assessment System) projet concernant les différentes architectures de maintenance conditionnelle (Muller, Marquez, & Iung, 2008).

Ainsi, dans la quatrième génération s'est imposée l'idée d'intégrer ces différentes briques intelligentes à travers un système d'information concrétisé par des plateformes de transferts et d'échange d'informations.

La Figure 1-6 présentée dans (Karim & al, 2008) illustre la nécessité d'intégrer ces systèmes d'aide à la maintenance.

La partie gauche de cette figure illustre la tâche difficile d'un technicien de maintenance qui doit être connecté à différentes applications pour ensuite accéder à chaque application, récupérer les informations pertinentes et les synthétiser afin de les adapter à l'utilisateur dans le but de lui faciliter la tâche pour faire face aux différentes nécessités de maintenance se présentant à lui et lui permettre d'utiliser ces informations dans une autre application.

Sur la partie droite de la figure, le technicien de maintenance ne doit être connecté qu'à la plateforme de e-maintenance et ensuite avoir une interface unique permettant l'accès et la manipulation de toutes les applications intégrées. Ainsi, l'intégration⁶ et la collaboration⁷ dans les systèmes sont considérées donc comme les principales

⁶ L'intégration de systèmes est le processus qui crée les liens physiques et fonctionnelles entre différents systèmes informatiques et différents applications logicielles hétérogènes afin qu'ils agissent comme un seul système coordonné. (Ruh, Maginnis, & Brown, 2001)

méthodes permettant de conduire le système de maintenance vers l'amélioration de la productivité et de l'efficacité.

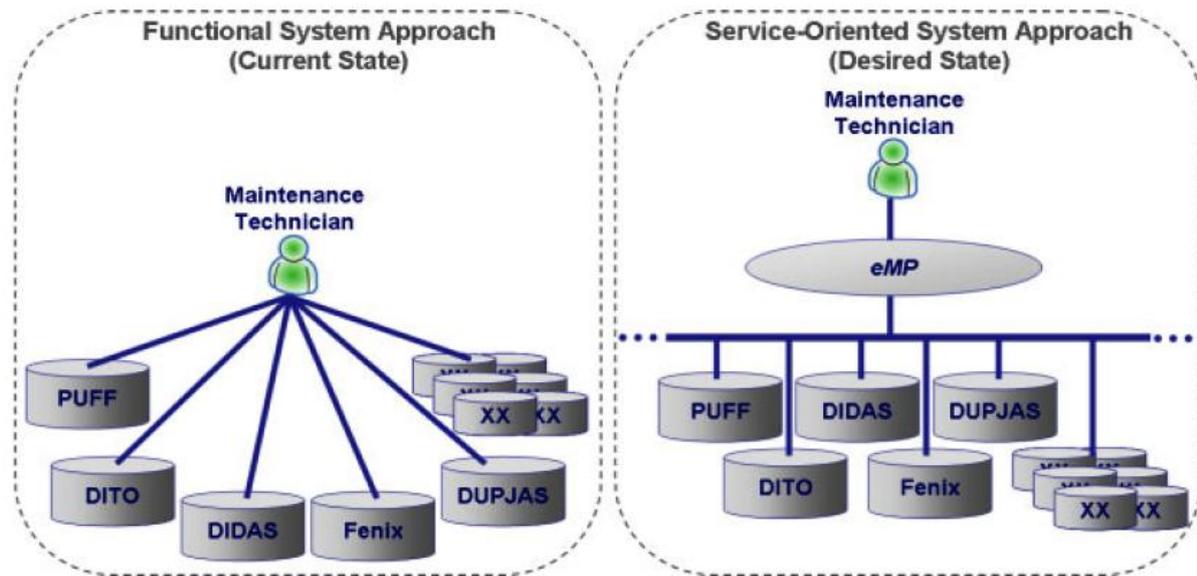


Figure 1-6 Illustration des besoins de technicien en maintenance dans un SI (Karim, Kajko-Mattsson, & Söderholm, 2008)

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) ont permis d'asseoir ces nouvelles pratiques et de les faire évoluer. Grâce à l'émergence de ces technologies, la réalisation des services de maintenance et des contrôles peut être effectuée automatiquement, à distance et à l'aide de différents systèmes informatiques implantés au sein des entreprises. Un projet Européen PROTEUS (Bangemann, et al., 2006), a mis en place une première plateforme de e-maintenance proposant des systèmes d'aide à la maintenance à travers des services web.

Parallèlement, les outils de GMAO ont évolué et ont proposé d'avoir des connexions potentielles avec d'autres applications ou systèmes, comme par exemple « les lecteurs de valeurs mesurées », les appareils mobiles, des catalogues externes, des outils de CAO ou encore des sites Web (cf. Liebstückel, K. (2001), p.10).

La nouvelle génération de GMAO fournie sur le marché peut être vue comme un système d'aide à la décision ayant des objectifs de contrôle de coûts de maintenance et d'intervention, d'optimisation des ressources humaines et techniques comme les stocks de pièces de rechanges et les outils, de détails des installations techniques et de documentation associée et de mesurer d'efficacité des activités de maintenance (indicateurs de maintenance).

Dans cette génération des systèmes d'information orientés métier, les données et les informations liées à la maintenance ont été mises en place dans MIMOSA (Kahn, 2003) et les modèles structurés de données sont la référence en maintenance. Ces projets cherchent à intégrer toutes les applications de support de maintenance

⁷ La collaboration : travailler ensemble pour atteindre un objectif (Collins English Dictionary, 2011).

grâce à des services web comme PROTEUS, y compris l'intégration de la maintenance proactive (DYNAMITE⁸) et les données du cycle de vie d'un produit (PROMISE⁹).

Une des préoccupations commune de ces projets était l'intégration de toutes ces applications dans un système d'information intelligent coopératif et distribué tout en assurant l'interopérabilité entre ces modules via une plateforme web distribuée basée sur des services Web (Muller, Marquez, & Iung, 2008). Ce type de système d'information de maintenance est appelé généralement plateforme de e-maintenance.

De plus, ces projets ont intégrés des outils de smart technologies dans ses plateformes comme le RFID, des capteurs intelligents, des appareils mobiles intelligents et des outils d'infotronic.

La cinquième génération qui au stade de la recherche est un système informatique qui doit répondre aux enjeux actuels de maintenance présentés dans la section 3.

En effet la plupart des recherches actuelles dans les systèmes informatiques sont axées sur la connaissance (Ermine, 2000), ceci a conduit les chercheurs de différents domaines à résoudre différents types de problèmes notamment des problèmes d'interopérabilité sémantique, à développer des applications sur la composition de services Web prenant appui sur des modèles de connaissance, à mettre en place des méthodes de self-maintenance (auto-maintenance) (Labib, 2006). Ces dernières applications de self maintenance utilisent des méthodes de raisonnement à base de règles ou de raisonnement floue inductif allié à des méthodes de raisonnement à partir de cas.

Par conséquent, la nouvelle génération de système d'information de maintenance doit prendre en compte non seulement les évolutions actuelles en matière de TIC sur les systèmes d'information orientés métier et utilisateur (le cas de la quatrième génération), mais aussi ceux orientés connaissance et qui seront à la base de cette cinquième génération. Pour cela, nous proposons comme cinquième génération des systèmes orientés connaissance, tout en exploitant les services Web, qui s'appuient sur l'ingénierie ontologique et les connaissances du domaine de maintenance. Ces systèmes peuvent générer de la nouvelle connaissance et sont à même d'exploiter les nouveaux concepts de l'informatique autonome (autonomic computing) (Ganek & Corbi, 2003), les services à la demande et le « *cloud computing* » (Hayes, 2008).

Le cœur de ce système est un système de gestion de connaissance capable d'inférer de la nouvelle connaissance et de fournir des services dynamiques grâce à des systèmes d'auto-apprentissage ; les systèmes d'auto-maintenance (self-maintenance), de retour d'expériences comme sources de génération de nouvelles connaissances.

⁸ Dynamic Decisions in *Maintenance* : <http://dynamite.vtt.fi/>

⁹ PROduct lifecycle management and Information tracking using Smart Embedded systems
<http://www.promise.no/>

Tableau 1-1 Différentes générations de systèmes de gestion de maintenance

	1° génération	2° génération	3° génération	4° génération	5° génération
Système de Maintenance	Compétences de réparation manuelle	Gestion de Maintenance Assistée par ordinateur)	TTAO10 ; TMAO11 ; Systèmes Experts ; GMAO + ERP ; architecture CBM	e-maintenance ; plateforme coopérative distribuée de maintenance	s-maintenance ; systèmes d'auto-maintenance ;
Informatisation	Pas d'informatisation. Arrêter l'équipement quand il se casse	L'informatisation des procédures de maintenance. Suivi des interventions et des coûts de maintenance	Intégrer d'autres fonctions dans la fonction de maintenance ; Evolution dans les différents champs de la maintenance	Intégration de modules intelligents dans un système d'information orienté métier	Système d'information orienté connaissance utilisateur
Type de Maintenance	Exécution jusqu'à la défaillance ; Maintenance Réactive	Maintenance Réactive et Préventive	Surveillance conditionnée (condition monitoring) ; Maintenance Prédictive	Maintenance Proactive	Self maintenance (auto maintenance)
Analyse d'équipement		Composition de l'équipement ; Les plans et dessins des équipements	Analyse vibratoire, oil analysis, analyse d'huile, thermographie IR, ultrasons à chaud, Contrôle non destructif ;	AMDEC; analyse par arbre de défaillances; des technologies intelligentes	
Surveillance de l'équipement			Système d'acquisition, de supervision et de contrôle (SCADA)	Infotronique ; système de pronostics ; système de diagnostic ; capitalisation des connaissances ;	Infotronique, Retour d'expérience ;
Gestion des ressources		Gestion des interventions (panne et inspection), Révisions planifiées ; Systèmes de planification et de contrôle (diagrammes de PERT et de Gantt) ; Inventaire des pièces de rechange.	Planification de la maintenance ; Gestion des ressources humaines ; Gestion de logistique ;	Planification commune ; Production de la maintenance ;	Gestion interactive des ressources et réutilisation des planifications passées.
Politiques et stratégies de maintenance	Maintenance centrée sur la fiabilité (RCM)	Coûts de maintenance réduits (Lower maintenance costs) ; Coûts de cycle de vie (Life Cycle Costing LCC) ; Indicateurs de maintenance (MBR, MBF) ;	Disponibilité supérieur de l'équipement ; Durée de vie prolongée de l'équipement ; Gestion de la qualité totale ; Maintenance en Condition Opérationnelle ;	Plus grande disponibilité, fiabilité et sécurité; Produit de meilleure qualité, vie plus longue ; Plus grande efficacité des coûts ; Pas de dommages à l'environnement ; Design pour la maintenabilité et la fiabilité	Système avec une redondance autorisée pour l'exécution jusqu' à l'échec ; Gestion du cycle de vie ; Combiner les outils de conception et les outils de maintenance ;

¹⁰ Travaux Techniques Assistés par Ordinateur¹¹ Techniques de Maintenance Assistées par ordinateur.

4.2- Caractérisation des systèmes de maintenance

Rasovska et al dans (Rasovska, Morello-Chebel, & Zerhouni, 2007) ont listé, caractérisé et classifié les différentes architectures des systèmes informatiques de maintenance existants suivant deux critères : l'évolution de l'information utilisée et la relation entre les systèmes intégrés dans les architectures. Quatre architectures génériques ont été identifiées, à savoir maintenance, télémaintenance, e-maintenance et s-maintenance figure 1.7.

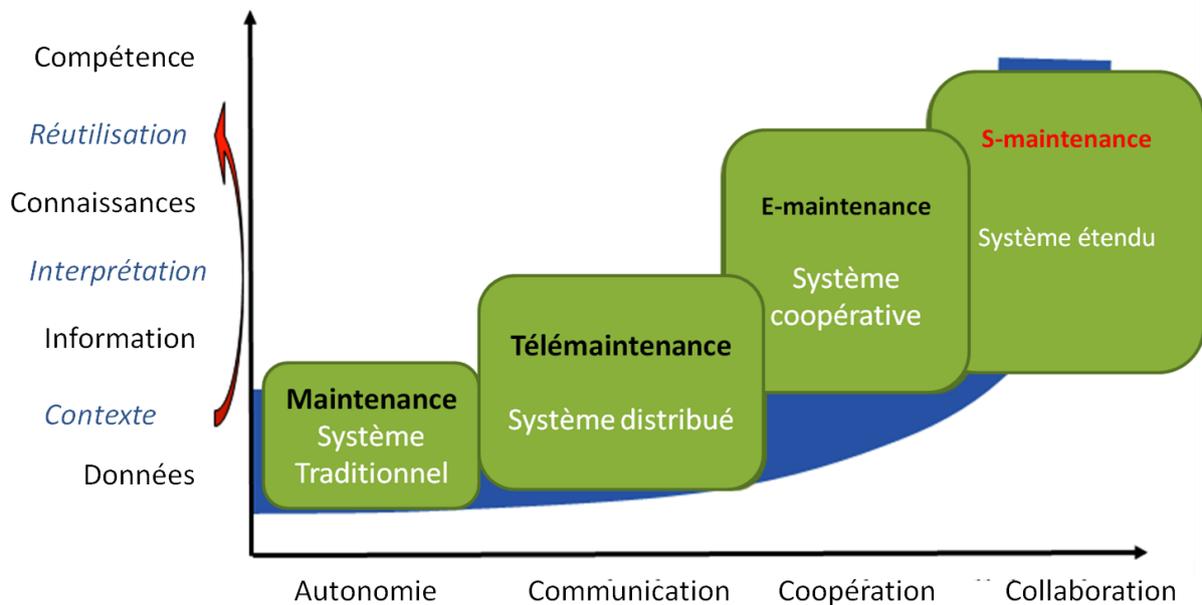


Figure 1-7 Classification des architectures des systèmes de maintenance

La figure 1-7 illustre le positionnement des architectures de maintenance en fonction de deux axes : le type d'information échangée et l'intensité des relations entre les systèmes intégrés dans la plateforme.

Les définitions relatives aux notions d'autonomie de communication, de coopération, de collaboration, ainsi que les données, information, connaissance et compétences sont fournies en annexe 2. Les architectures de maintenance sont classées suivant une exponentielle car la collaboration entre ces systèmes est atteinte plus tôt que le niveau de compétence partagée. Le volume des informations gérées automatiquement se concrétise par la surface de la place de chaque système et augmente avec l'intensité de la collaboration et à la complexité de l'information partagée (Rasovska, Morello-Chebel, & Zerhouni, 2007).

Ainsi, le système de s-maintenance prend appui sur le concept d'e-maintenance avec un échange d'informations non plus seulement sur les web services mais nécessitant des contraintes supplémentaires basées sur la sémantique de l'information échangée. Cette sémantique s'appuie sur une ontologie du domaine de maintenance commune aux différents systèmes. Elle permet d'utiliser et de créer des connaissances et des compétences qui aboutissent à la capitalisation des connaissances. Les systèmes collaborent, ce qui suppose un effort coordonné pour résoudre ensemble des problèmes.

5. La e-maintenance

L'objectif principal d'une plateforme d'intégration comme une plateforme de e-maintenance est de passer de la coexistence à la coopération des modules intelligents de maintenance dans le même environnement et de fournir les bonnes conditions pour l'orchestration de composants afin de fournir un service global intégré pour l'utilisateur de la plateforme.

5.1- Les définitions de la e-maintenance

5.1.1- définitions existantes

Le terme e-maintenance a vu le jour depuis le début des années 2000 et il est maintenant un terme très commun dans la littérature lié à une maintenance. Ingénieurs ou scientifiques peuvent considérer la e-maintenance en tant que concept, ou comme une philosophie, ou comme un phénomène, etc.

Selon Baldwin (Baldwin, 2004), le « e » dans la e-maintenance signifie « excellente » et présente la e-maintenance comme une agrégation de différents aspects à savoir :

E-Maintenance = Excellent-Maintenance = Efficient maintenance (faire plus avec moins de gens et moins d'argent) + Effective maintenance (amélioration des mesures FDMS) + Enterprise maintenance (contribuer directement à la performance de l'entreprise) (Baldwin, 2004).

Tout d'abord, un point crucial doit être clarifié, par analogie avec la programmation orientée objets nous tenons à dissocier le concept de e-maintenance (correspondant à une classe abstraite) de la notion de plate-forme de e-maintenance (correspondant à une classe), et une plateforme implémentée via des technologies spécifiques (correspond à l'objet) chacun ayant sa propre définition. Par conséquent, nous considérons que le concept de e-maintenance est un concept abstrait qui doit avoir une définition conceptuelle plus générale que la définition de la plateforme qui représente un modèle réalisant ce concept abstrait. De plus, la définition de la plateforme doit être aussi indépendante des technologies spécifiques utilisées dans une plateforme, car il peut y avoir différentes plateformes suivant le modèle de plateforme de e-maintenance utilisant des technologies différentes.

Ainsi, un des problèmes dans les travaux actuels est qu'il existe différentes définitions d'une plateforme de e-maintenance, définition dépendante du point de vue des auteurs de leurs expertises et de l'objectif visé.

Muller et al identifient en (Muller, Marquez, & Iung, 2008), des points de vue différents comme les stratégies de maintenance, les plans de maintenance, le type de maintenance et les supports de maintenance.

Certains considèrent la e-maintenance comme une stratégie de maintenance, où les tâches sont gérées électroniquement par l'utilisation de données temps réelles obtenues grâce aux technologies numériques et des technologies Internet (Tsang A. , 2002).

D'autres considèrent que la e-maintenance est un plan de maintenance exploitant des approches de CBM¹² (Tsang A. H., 1995), la maintenance proactive, la maintenance collaborative, la maintenance à distance (télémaintenance) et les services de support, approvisionner l'accès à l'information en temps réel, et l'intégration de la production à la maintenance (Ucar & Qiu, 2005). Un autre point de vue présenté par Koc et Lee (Koc & Lee, 2001) identifie le système de e-maintenance à un système de maintenance prévisionnelle, qui ne prévoit que la surveillance et les fonctions d'anticipation tel que le pronostic. Par contre Zhang et al (Zhang, Halang, & Diedrich, 2003) considèrent la e-maintenance comme la combinaison de technologie de services Web et la technologie des agents fournissant un moyen de réaliser des fonctions intelligentes et de coopération pour les systèmes d'automatisation industrielle. Crespo Marquez et Gupta (Crespo Marquez & Gupta, 2006) définissent la e-maintenance comme un environnement d'intelligence artificielle distribuée comprenant les capacités de traitement de l'information, d'aide à la décision et des outils de communication et de collaboration entre les processus de maintenance et les systèmes experts.

Nous pouvons remarquer par conséquent que chaque définition propose une vue partielle de la maintenance (par exemple maintenance prévisionnelle) et ne différencie nullement le concept de la plateforme. Une confusion s'instaure quand on relie le concept à un ensemble de technologies bien particulières comme les services Web ou les agents intelligents.

D'un point de vue métier, et plus particulièrement point de vue orienté intervention, la e-maintenance est définie par Karim (Karim, 2008) comme la part du support de maintenance qui assure que le processus de maintenance soit aligné avec les processus de fonctionnement et de modification afin d'obtenir les objectifs métiers exigés par les intervenants, grâce à une logistique d'information¹³ (Willems, 2008) appropriée par l'utilisation des technologies d'information et de communication et la fourniture de services d'information.

D'un point de vue plus étendu, Moore et Starr (Moore & Starr, 2006) définissent la e-maintenance comme un réseau d'information de gestion des biens, qui intègre et synchronise diverses applications de maintenance et de fiabilité dans un seul système et permet de fournir des informations sur les biens là où c'est nécessaire quand c'est nécessaire.

Devant cette diversité de définitions et de points de vue une définition générique est fortement recommandée. Nous devons adopter une définition qui enveloppe le processus global de maintenance. À cette fin Muller et al dans (Muller, Marquez, & Iung, 2008) présentent une définition prenant en compte les différents points de vue et adoptent que la e-maintenance est une composante du concept d'e-manufacturing. Ils définissent ce concept comme un support de maintenance qui comprend les ressources, les services et la gestion nécessaire permettant une exécution proactive du processus de décision. Ce support comprend les e-technologies (les TIC, le Web, les réseaux sans fil, technologies d'Infotronics) mais aussi, les activités de e-maintenance (opérations ou de processus) telles que la e-surveillance, le e-diagnostic, le e-pronostic, etc.

¹² Condition Based Maintenance

¹³ Information Logistics (IL) peut être définie comme «gérer et contrôler les processus de traitement des informations de manière optimale par rapport au temps (temps d'écoulement et la capacité), le stockage, la distribution et la présentation de telle manière qu'elle contribue aux résultats de l'entreprise en concurrence avec les coûts de la capture (création, recherche, etc entretien).

Comme le montre la Figure 1-8, Lee et al concluent que la e-maintenance est un pilier majeur dans les industries modernes qui prend en charge la réussite de l'intégration du e-manufacturing et e-business (Koc, Ni, Lee, & Bandyopadhyay, 2003).

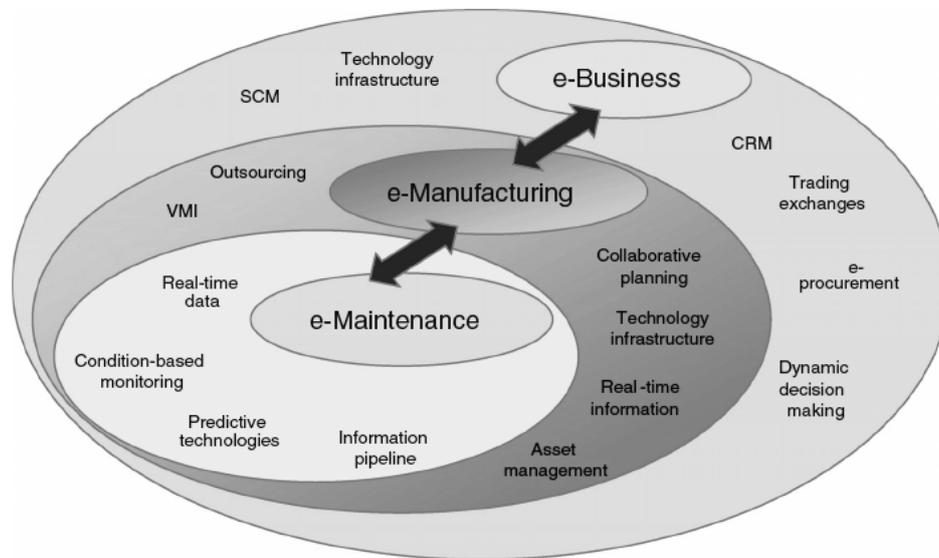


Figure 1-8 Inclusion de la e-maintenance dans le e-manufacturing et le e-business (Koc, Ni, Lee, & Bandyopadhyay, 2003)

Ces définitions sont insatisfaisantes et mélangent dans la plupart des cas concepts et technologies. Nous proposons une définition qui a comme ambition de tenir compte du processus global de maintenance, de resituer ce concept par rapport au business et de le rendre indépendant de la technologie afin de proposer une définition générique.

5.1.2- Proposition d'une définition de e-maintenance

Tant que la e-maintenance est inspirée du e-business elle peut être considérée comme l'un de ses concepts dérivés. En effet, nous adhérons au fait que la définition de la e-maintenance doit être inspirée de la définition du commerce électronique tout en respectant la définition de la maintenance. À cette fin, nous nous référons aux définitions de la maintenance et du e-business.

Diverses définitions du e-business sont présentées dans la littérature, nous adoptons celle présentée par Jones et al qui définissent le e-business comme *la réalisation des activités qui conduisent à un échange de valeur, où les parties interagissent électroniquement, en utilisant les technologies de réseau ou de télécommunications* (Jones, Wilikens, Morris, & Masera, 2000).

Sur la base de cette définition et celle de la maintenance, nous définissons la e-maintenance comme suit:

«La e-maintenance est la réalisation de la maintenance, où toutes ses actions ou activités techniques, administratives et de gestion interagissent et coopèrent par voie électronique, en utilisant les technologies de réseau ou de télécommunications ».

Cette définition prend en compte le processus de maintenance global présenté par Karim (Karim, 2008) (voir Figure I.5) pour inclure les différents points de vue de la maintenance et les différentes expertises (c.à.d. techniques, administrative et de gestion). Nous mettons en évidence l'interaction électronique et la coopération entre les actions et les activités assurées par les différents acteurs (humain ou logiciel) impliqués dans ce processus.

5.1.3- définition de la plateforme de e-maintenance

Nous définissons la plateforme de e-maintenance à partir du concept de maintenance. Sachant que ce dernier met le point sur l'aspect coopération, nous devons donc prendre en considération la définition d'une plateforme de coopération.

En effet, Les plateformes de coopération sont définies comme un environnement de travail logiciel composé de différents composants logiciels à partir desquels ceux-ci agissent ensemble pour atteindre des propriétés globales. Saint-Voirin affirme qu'une plateforme coopérative est vue comme un ensemble de collecticiels présentant des fonctions spécifiques regroupées dans une plateforme intégrée (Saint-Voirin, 2006).

Par conséquent, nous définissons une plateforme de e-maintenance comme :

« Une plateforme de e-maintenance est une plateforme de coopération offrant un ensemble de composants logiciels et de services logiciels intelligents d'aide à la maintenance (applications intégrées et / ou à distances) qui permettra aux acteurs de maintenance de communiquer et de travailler ensemble pour réaliser le processus complet de maintenance. ».

Dans cette définition, nous avons souligné les points d'intégration et de distributivité qui caractérisent la plupart des plateformes existantes et imposées par le monde réel de l'industrie. Nous nous sommes intéressés aux composants logiciels qui présentent les diverses applications de diagnostic, de pronostic, de surveillance, etc. à la communication et l'interopérabilité entre ces éléments.

5.1.4- Discussion et analyse des définitions

Dans les deux définitions que nous avons présentées, nous avons respecté la séparation et la différenciation entre le concept et la plateforme de e-maintenance.

Par rapport aux définitions existantes que nous avons passées en revue dans les sections précédentes, nous pouvons constater la généralité de notre définition qui se base sur la définition de l'AFNOR de la maintenance. En effet, cette définition met le point sur l'objectif de la e-maintenance qui est *la réalisation de la maintenance* en prenant en considération tout le processus de maintenance sans se limiter à un type ou une stratégie de maintenance *aussi performante soit elle*, ainsi que la prise en considération de l'aspect coopération et interactions électroniques. Ceci n'est pas vraiment le cas avec les définitions plus restreintes de Tsang (Tsang A., 2002) qui limite la e-maintenance à une stratégie de maintenance et néglige l'aspect interactions en parlant juste d'utilisation de données en temps réel. De même Ucar et Qiu (Ucar & Qiu, 2005) se limitent à des types et stratégies de maintenance et en focalisant sur l'accès temps réel à l'information. De plus la définition fournie par Karim (Karim, 2008) n'est concentré que sur la partie intervention et néglige le reste du processus de

maintenance en se basant sur le contrôle, le stockage et la distribution de l'information qui est un aspect à traiter dans la définition de la plateforme et non pas celle du concept.

D'autre part, deux définitions sont proches de notre définition comme celle de Moore et Starr et celle de Muller et al. La définition fournie par Muller et al considère que la e-maintenance est un support de maintenance permettant une exécution proactive ce qui limite l'objectif de ce concept par rapport à la réalisation du processus de maintenance. En effet, on vise à faire de la maintenance proactive mais cela ne nous dispense pas de proposer d'autres types de maintenance et d'en tenir compte dans la plateforme. De plus, cette définition met le point sur des aspects technologiques qui doivent être placés dans la définition de la plateforme et non pas dans celle du concept. Elle se contente de parler d'activités de e-maintenance sans mentionner la relation et les interactions entre ces activités sachant que la définition fournie ne mentionne nulle part que la e-maintenance est un processus composé d'activités.

En ce qui concerne la définition de Moor et Starr, nous pouvons constater qu'il y a une séparation entre concept et plateforme. Mais ce qui limite cette définition c'est son orientation vers la gestion des biens (Asset Management) en considérant la e-maintenance comme un réseau d'information dans la gestion des biens. De plus, en ce qui concerne l'intégration, Moor et Starr parlent de synchronisation plus limitée que la coopération existante entre les applications intégrées dans la e-maintenance.

En ce qui concerne la définition de la plateforme, nous considérons que notre définition est aussi générique dans le but de couvrir les plateformes existantes utilisant telles ou telles technologies. Nous avons mis en évidence l'intégration en utilisant l'expression «*un ensemble de composants logiciels et de services logiciels intelligents* ». Ceci inclut aussi l'aspect intelligence que peut proposer des méthodes à base d'agents intelligents ou d'intelligence artificielle. Ainsi, nous avons mis en évidence l'aspect distributivité (*intégrés et / ou à distance*) ainsi que la coopération et la communication ce qui permet d'intégrer l'utilisation de n'importe quelles technologies réseaux.

En passant en revue les définitions existantes de e-maintenance, nous avons pu classer deux définitions comme définition de plateforme et non pas de concept de e-maintenance. En effet, Zhang et al (Zhang & al, 2003) spécifie l'aspect de coopération mais limite la plateforme à une combinaison des technologies de services web avec les technologies agents. Par contre la définition présentée par Crespo-Marquez et Gupta (Crespo-Marquez & Gupta, 2006) est plus évoluée que la première mais elle situe la plateforme dans un environnement d'intelligence artificielle distribuée, ce qui est spécifique à cette plateforme. Ainsi, nous remarquons une ambiguïté dans cette définition quand les auteurs mentionnent que c'est un environnement «*Comprenant les capacités de, ... et de collaboration entre les processus de maintenance et les systèmes experts* ». Ces deux définitions s'orientent vers un aspect particulier de la technologie employée et excluent un grand nombre de plateformes de e-maintenance existantes qui ne sont pas basées ni sur les services Web ni sur des méthodes d'intelligences artificielles.

5.2- Limites de la e-maintenance

L'intégration dans la e-maintenance est nécessairement faite par l'échange des données entre les composants et les applications intégrées. Ceci montre que celles-ci doivent faire face aux problèmes d'échange de données

entre sites, et de prendre en compte la diversité des formats des données et de grands volumes de données produites par les différentes applications. Ce qui induit des problèmes d'interopérabilité, de coopération et de partage de connaissances entre les applications, ayant une grande diversité de modèles d'exécution: temps réel pour SCADA¹⁴, transactionnelles pour les données de documentation et l'ERP¹⁵, interactif pour les dialogues homme machine et décisionnel pour les applications d'aide.

Les systèmes proposant différents formats d'information ne sont pas toujours compatibles pour le partage de données et de connaissances ce qui nécessite coordination et coopération entre ces systèmes pour les rendre interopérables. A ces fins, la plupart des plateformes existantes utilisent les Web services pour garantir l'interopérabilité technique mais pas sémantique entre ses différentes applications intégrées. La mise en place d'adaptateurs entre ces services web et la normalisation des données échangées sont toujours des tâches très compliquées, et ne traitent pas de la sémantique des données échangées.

L'interopérabilité est définie par le « *IEEE Computer Standard Dictionary* » comme «la capacité de deux ou plusieurs systèmes ou composants à échanger des informations et à utiliser les informations qui ont été échangées» (IEEE Computer Dictionary, 1990). A partir de cette définition, il est possible de décomposer l'interopérabilité en deux composantes distinctes : la capacité à échanger des informations, et la capacité à utiliser l'information une fois qu'elle a été reçue. Le premier processus est appelé «l'interopérabilité syntaxique», quant au deuxième, il est appelé «l'interopérabilité sémantique».

En effet, l'interopérabilité syntaxique assurée aujourd'hui par les plateformes de e-maintenance solutionne à moitié le problème, et doivent être orientée vers une interopérabilité sémantique assurant un niveau élevé d'échange d'information et même de connaissances, (Shedrof, 1999) pour garantir un échange efficace de l'information entre les applications hétérogènes de maintenance. Si l'interopérabilité sémantique n'est pas définie il peut survenir un conflit sémantique (Pollock, 2001).

Par ailleurs, concernant le partage de connaissances, la e-maintenance s'est penchée jusqu'à présent sur l'intégration et la coopération, ce qui a orienté les plateformes de e-maintenance vers l'échange de données et d'information et ne s'intéressent pas à cet aspect de partage de connaissances.

Pour répondre aux nouveaux besoins des acteurs de maintenance, nous proposons d'élaborer une plateforme devant assurer une bonne exploitation des connaissances par des raisonnements logiques permettant de faire évoluer le capital de connaissance du système de maintenance et de ses applications intégrées.

6. La s-maintenance : réponse aux nouveaux enjeux de la maintenance

Dans le but d'améliorer les performances des processus de maintenance fournis par la e-maintenance au niveau de la communication et de l'échange des données et de connaissances entre les systèmes ainsi qu'au niveau de l'exploitation de ces connaissances, nous proposons le concept de s-maintenance. Ce concept crée

¹⁴ Supervisory Control And Data Acquisition

¹⁵ Enterprise Resource Planning

un environnement d'information sémantiquement compatible, basé sur des concepts convenus entre différentes entités dans la maintenance. Dans ce cadre, il donne une solution pour la réalisation de l'interopérabilité sémantique au niveau de la plateforme de maintenance. Ainsi, l'objectif principal de ce concept est de répondre aux besoins évolutifs, aux exigences des acteurs de maintenance qui sont les utilisateurs réels de ces systèmes et de remédier aux limites de la e-maintenance. Le besoin principal peut se résumer par «Avoir la bonne information au bon format pour les bonnes personnes pour faire les bonnes choses au bon moment » (Lee & Wang, 2008). Par conséquent, ce concept ne s'arrête pas à la mise à disposition des services intégrés dans la plateforme comme le cas de la e-maintenance, mais il va plus loin en fournissant des services adaptés dynamiquement à la demande, et en assurant des services d'auto-X sans interventions humaines.

Afin de faire face aux enjeux de demain, et de proposer un système capable de donner une solution durable, la gestion de maintenance à besoin d'un système dynamique, évolutif (l'intelligence du système évolue au fur et à mesure de son exécution), capable d'analyser ses comportements et d'en tirer une expérience.

6.1- La définition du concept de s-maintenance

Nous rappelons que la définition du concept de s-maintenance prend appui sur la définition de la e-maintenance qui est générale et qui dépend elle-même de la définition de la maintenance. Mais des contraintes sont imposées orientant ainsi la réalisation de ce concept vers la connaissance.

La s-maintenance « est la réalisation de la maintenance basée sur la connaissance experte du domaine, où les systèmes dans le réseau gèrent ces connaissances et partagent la sémantique faisant émerger de nouvelles génération de services et offrant des services à la demande, grâce à des fonctionnalités adaptatives et autonomes ».

Gérer la connaissance ceci entend la formalisation, l'acquisition, le raisonnement, la maintenance, l'exploitation et la réutilisation de la connaissance ainsi que sa réalimentation (Menziez, 2000). Par nouveaux services de maintenances, nous entendons des services dynamiques (ayant des comportements évolutifs) adaptables aux besoins des utilisateurs grâce à des fonctionnalités d'auto-X [self-x] comme l'auto-apprentissage, l'autogestion, etc.

Par service à la demande, nous entendons nouveau service dont le résultat généré est par des activités entre composants du système et utilisateur, par des activités internes au système, destiné à répondre à une demande, non fournie par les services existants et exprimée par un utilisateur.

6.2- Définition des fonctionnalités d'auto apprentissage et d'autogestion

La fonctionnalité d'auto-apprentissage (self-learning) peut être définie comme « la fonctionnalité qui permet au système tout au long de son exécution et grâce à des connaissances de départ, d'apprendre automatiquement, de créer ainsi de nouvelles connaissances et de les exploiter lors de futures exécutions ». Par conséquent, cette fonctionnalité permettra au système concerné de faire évoluer son degré d'intelligence.

D'autre part, la fonctionnalité d'autogestion (self-management) est définie comme « *la fonctionnalité qui permet au système grâce à des connaissances sur ses comportements, de gérer automatiquement et sans intervention humaine quelques activités appartenant au processus métier géré par celui-ci* ». Ceci permettra donc au système concerné de faire évoluer, réorganiser et adapter ses comportements (les processus) lors de son exécution.

6.3- Définition d'une plateforme de s-maintenance

La collaboration est l'une des caractéristiques de base de la s-maintenance en sachant que tout système dans le réseau agit collectivement dans un même objectif en utilisant et en partageant les ressources communes à savoir les connaissances expertes du domaine dans ce cas. Par conséquent, pour définir la plateforme de s-maintenance nous devons prendre en considération la définition de la plateforme de collaboration.

En effet, les plateformes de collaboration sont des plateformes électroniques unifiées qui facilitent la communication synchrone et asynchrone à travers une variété de dispositifs. Les plateformes de collaboration offrent un ensemble de composants logiciels et de services logiciels permettant aux individus de trouver les uns et les autres, les informations dont ils ont besoin et d'être capable de communiquer et de travailler ensemble pour atteindre des objectifs métiers communs.

D'où, la définition d'une plateforme de s-maintenance concrétisant le concept de s-maintenance:

« Une plateforme de s-maintenance est un système collaboratif et distribué basé sur l'ingénierie des connaissances fournissant des services dynamiques et des services à la demande selon les exigences de ses utilisateurs grâce à des fonctionnalités d'autogestion des processus de maintenance et d'auto-apprentissage ».

Il est à noter aussi que nous entendons par services dynamiques les services évolutifs ayant la capacité d'adapter leurs comportements aux différents contextes d'utilisation.

Ainsi, ce système basé sur l'ingénierie des connaissances¹⁶ prend appui sur la sémantique de la connaissance experte du domaine de maintenance, et a la possibilité de faire évoluer son degré d'intelligence. A cette fin, nous utiliserons comme cœur de la plateforme un système à base de connaissances¹⁷ permettant d'inférer une nouvelle connaissance et de l'exploiter à partir d'une ontologie du domaine de maintenance. Ceci fera l'objet du chapitre 4.

¹⁶ À distinguer de la gestion des connaissances, l'ingénierie des connaissances, fait référence à l'ingénierie de systèmes intelligents incorporant beaucoup de connaissances tels les Systèmes Experts.

¹⁷ Les systèmes à base de connaissances (Knowledge Based System en anglais) sont des outils d'intelligence artificielle qui fonctionnent sur un domaine étroit pour fournir des décisions intelligentes avec justification. Les avantages offerts par un tel système sont la documentation des connaissances, aide à la décision intelligente, auto-apprentissage, le raisonnement et l'explication. Les composants de base de ces systèmes sont une base de connaissances, des mécanismes d'acquisition de connaissances et des mécanismes d'inférence (Akerkar & Srinivas, 2009).

La Figure 1-9, montre la relation d'inclusion entre les plateformes de maintenance, de e-maintenance et de s-maintenance et définit à partir de chaque concept leurs caractéristiques.

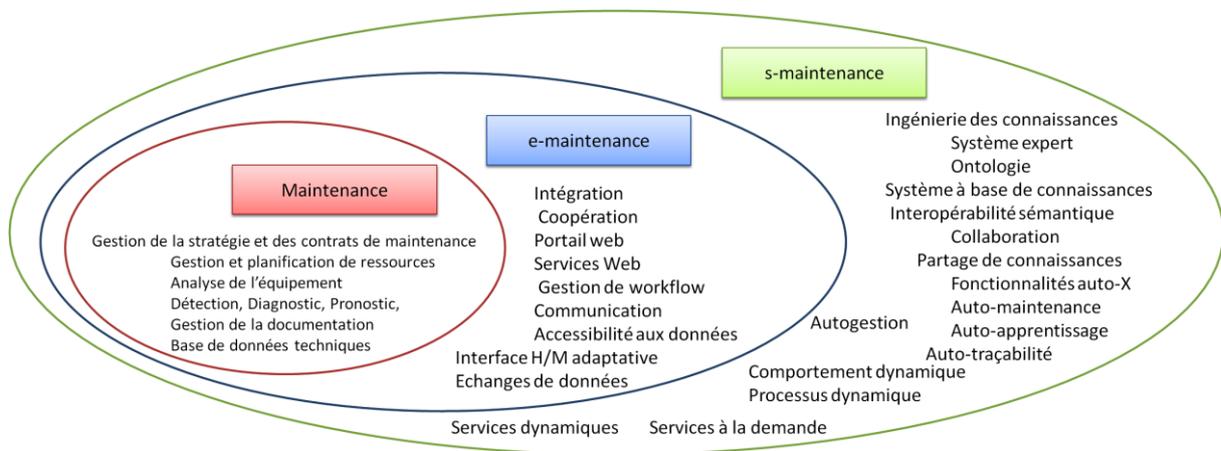


Figure 1-9 Inclusion des fonctionnalités dans les plateformes de maintenance, e-maintenance et s-maintenance

Nous constatons que la plateforme de s-maintenance englobe les fonctionnalités de la plateforme de e-maintenance, et transforme un outil d'intégration en un acteur intelligent au cœur du processus de maintenance. En outre, les services fournis par un système de maintenance ou de e-maintenance sont inclus dans un système de s-maintenance comme indiqué dans la figure 1-9.

Ces systèmes informatiques de maintenance fournissent des fonctionnalités à valeurs ajoutées pour les opérateurs de maintenance (end users). Nous nous intéressons au problème de réutilisation des connaissances et de consultation de nouveaux indicateurs dans le cadre d'un système de maintenance traditionnel, de e-maintenance et de s-maintenance.

La réutilisation des connaissances, par un nouvel employé remplaçant une personne partie n'est pas évidente. Elle n'est possible ni dans une GMAO ni dans le cadre d'une plateforme de e-maintenance, car aucun module spécifique, sur l'expertise demandée, n'est censé être intégré dans ces outils logiciels. Ceci étant dû à la non formalisation des connaissances. Par contre les fonctionnalités de la plateforme de s-maintenance de management de connaissances (exploitation de l'ontologie, auto-apprentissage, etc.) permettent d'obtenir de nouvelles connaissances pouvant être réutilisées par les nouveaux arrivants.

Nous nous intéressons maintenant au besoin de nouveaux indicateurs par le *end-user*. Dans une plateforme de e-maintenance ou d'une GMAO, les services ou applications intégrés fournissent des indicateurs prédéfinis. Si l'utilisateur d'une plateforme de e-maintenance a besoin d'un nouvel indicateur, il doit demander à un fournisseur, ou à un informaticien de lui développer un service destiné à cet effet. Par contre, dans le cadre de la plateforme de s-maintenance, grâce au service à la demande que la plateforme fournisse, l'utilisateur peut exprimer ses besoins de manière semi-formelle en utilisant la base de connaissance de la plateforme. La plateforme grâce à son moteur d'inférence lui fournit l'indicateur demandé.

7. Conclusion

Les services, les fonctionnalités et les indicateurs fournis par les systèmes informatiques de maintenance n'évoluent pas automatiquement avec les besoins des utilisateurs. Ces besoins peuvent se résumer par la maîtrise et le contrôle du processus complet de maintenance, la réutilisation et l'exploitation des historiques relatifs aux différents types de retour d'expériences et par des outils et techniques intelligents supportant l'aide à la décision.

Afin de remédier à l'insatisfaction des utilisateurs quant à leurs besoins et aux limites des systèmes existants, nous avons étudié les enjeux auxquels doit faire face les futurs systèmes informatiques de maintenance.

Les grands enjeux identifiés à l'issue de cette étude sont la synchronisation entre les différentes applications de support (coopération, collaboration), la standardisation (langage commun), le traitement intelligent, la réutilisation et l'exploitation des connaissances métier, la mise en place de différents modules autonomes¹⁸ intelligents évolutifs orientés vers un système d'utilisateur intégrant les nouvelles technologies performantes.

Afin de situer ces enjeux par rapport aux différentes générations de systèmes de maintenance et de monter l'insatisfaction des utilisateurs, nous avons été amenés à étudier l'évolution de ces systèmes, leurs caractéristiques et leurs fonctionnalités.

Cette étude nous a permis de recenser cinq générations de maintenance, la première basée sur les compétences des opérateurs humains, la deuxième concernant les systèmes de gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO), la troisième connectant la GMAO aux différentes fonctions de l'entreprise, la quatrième intégrant des briques logicielles intelligentes dans une plateforme d'échange d'informations, plateforme de e-maintenance, la cinquième orientée connaissance, garantissant l'interopérabilité sémantique entre les applications de la plateforme, nommée s-maintenance.

De manière générale, malgré la différence de niveau par rapport aux services fournis par ces systèmes, les aspects principaux que nous avons remarqués et qui limitent leurs réponses aux enjeux sont le manque de réutilisation et d'exploitation intelligente des connaissances expertes du domaine, l'utilisation de connaissances non standardisées et le faible niveau de synchronisation qui se limite à la communication et rarement à la coopération.

Un état de l'art sur le concept de e-maintenance nous a amené à constater, que la plupart des travaux dans le domaine ne différencient pas le concept, la plateforme et l'utilisation des technologies.

Par conséquent, nous avons proposé deux définitions, une concernant le concept de e-maintenance caractérisé par l'interaction coopérative et électronique entre les différentes actions du processus global de maintenance, et l'autre développant un modèle de plateforme caractérisée par l'intégration des modules informatiques intelligents réalisant les activités du processus de maintenance.

Ainsi, partant des limites de ce concept, nous l'avons fait évoluer vers le concept de s-maintenance.

La s-maintenance propose une réalisation de la maintenance basée sur le partage des connaissances expertes du domaine en fournissant des services adaptatifs et autonomes. Ce concept est concrétisé par une plateforme qui

¹⁸ Fait référence à « autonomic computing » .

formalise ces connaissances et les partage entre les différentes applications intégrées dans le système, ce qui garantit une interopérabilité technique et sémantique.

Basé sur un système de gestion des connaissances comportant un moteur d'inférence supportant différents types de raisonnement, la plateforme doit fournir dynamiquement des services à la demande (pour les indicateurs définis par l'utilisateur) ainsi qu'assurer des fonctionnalités auto-X (connus par *self-X functionalities* en anglais). Parmi ces fonctionnalités nous trouvons l'autogestion des processus de la plateforme et l'auto-apprentissage relatif aux interactions des utilisateurs avec la plateforme pour assurer la dynamique de la base de connaissance de celle-ci.

Après avoir répondu à la question sur la caractérisation des nouveaux systèmes intelligents de maintenance, et une partie de la question sur la démarche à entreprendre pour la mise en œuvre de cette nouvelle génération de systèmes, les chapitres suivants répondront aux autres questions portant sur la réalisation de ce nouveau concept. Le deuxième chapitre sera donc consacré à faire un état de l'art des plateformes de maintenance existantes afin de les analyser par rapport aux critères définissant la plateforme de s-maintenance et exploiter ou proposer l'architecture la mieux adaptée pour élaborer une plateforme de s-maintenance.

