



Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID: 9831

To link to this article:

<http://jesa.revuesonline.com/article.jsp?articleId=12935>

To cite this version:

Seguy (Garcia), Anne and Noyes, Daniel and Clermont, Philippe
Caractérisation et estimation des performances en e-maintenance. (2009)
Journal Européen des Systèmes Automatisés, vol. 43 (n°1-2). pp. 73-101.
ISSN 1269-6935

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Caractérisation et estimation des performances en e-maintenance

Anne Séguy, Daniel Noyes, Philippe Clermont

*Laboratoire Génie de Production - École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
47, avenue d'Azereix B.P. 1629, 65016 Tarbes cedex France
anne.garcia@enit.fr, daniel.noyes@enit.fr, philippe.clermont@enit.fr*

RÉSUMÉ. Les activités de maintenance ont subi de profondes évolutions, suite à l'arrivée des Technologies d'Information et de Communication (TIC). Nous proposons dans cet article une démarche d'évaluation des performances d'une solution de e-maintenance. L'étude est centrée sur le déploiement des ressources de maintenance, plus particulièrement sur les ressources immatérielles (connaissances et compétences) rendues accessibles par le e-service. Nous modélisons d'abord les situations étudiées dans un contexte multiacteur et multimodèle. Nous proposons ensuite une approche de caractérisation des ressources immatérielles en intégrant un aspect quantitatif et un aspect qualitatif. Enfin, avant de conclure, nous donnons une première exploitation des indicateurs clefs au niveau de la répartition des connaissances nécessaires à l'obtention d'une intervention de qualité.

ABSTRACT. The maintenance activities underwent changes after the arrival of the ICTs (Information and Communication Technologies). This paper aims to present the results of a process of performance evaluation of an e-maintenance solution. This work begins with a modelling of the studied positions, in a multiacteur and multimodel context. Our study is centred on the deployment of the maintenance resources, more particularly on the intangible resources (knowledge and skill), accessible by the e-service. We propose next a formalization approach of these resources. Finally, we give a first exploitation of the keys indicators at the organization level of the knowledge distribution to ensure the interventions performance.

MOTS-CLÉS : maintenance, TIC (Technologies d'Information et de Communication), évaluation des performances, ingénierie des connaissances, UML.

KEYWORDS: maintenance, ICTs (Information and Communication Technologies), performance evaluation, knowledge management, UML.

1. Introduction

Depuis quelques années déjà, le monde des entreprises est en pleine évolution suite aux avancées technologiques liées notamment à l'avènement des Technologies d'Information et de Communication (TIC). Les modes de travail des entreprises ont été transformés avec l'apparition des notions de e-service, de travail collaboratif, de systèmes distribués, de mutualisation des connaissances... et des nouvelles possibilités offertes en termes de travail, d'organisation ou, encore, de processus décisionnels collaboratifs.

Parmi les fonctions et activités présentes dans une entreprise, nous avons choisi de focaliser nos travaux sur la maintenance. En effet, la fonction maintenance est une activité clef des entreprises et contribue de manière essentielle à la performance de celles-ci. Suite aux évolutions technologiques récentes, la maintenance a subi des modifications profondes, en passant de la maintenance traditionnelle à la télémaintenance puis à la e-maintenance grâce à l'intégration des TIC.

Notre approche de la fonction maintenance se place au niveau du responsable de cette fonction. En effet, le responsable de maintenance constitue la charnière entre les mainteneurs avec l'organisation de leur travail, et les dirigeants avec le déploiement des objectifs tactiques. Ce point de vue d'analyse nous permet d'aborder les performances de la fonction maintenance.

La performance globale de la fonction maintenance et des résultats qu'elle fournit dépend du déroulement des interventions et des étapes (détection, diagnostic, réparation...) qui les composent. Nous considérons que la disponibilité des connaissances et des compétences nécessaires à chaque étape est un facteur déterminant pour la réussite d'une intervention. Si une partie ou l'ensemble des connaissances ou des compétences nécessaires à l'intervention n'est pas disponible, la performance de celle-ci en sera altérée. Ainsi, nous corrélons la performance de la maintenance à la disponibilité des connaissances et des compétences nécessaires au déroulement des interventions qui la composent.

Nos travaux visent à étudier les apports des TIC en termes de connaissances et de compétences, dans le cadre de la fonction maintenance. Cette étude doit conduire, d'une part, à améliorer et à guider l'implantation et l'usage des TIC dans les processus de maintenance et, d'autre part, à améliorer l'organisation du service maintenance, en modifiant l'engagement physique des acteurs, capables maintenant d'intervenir à distance.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre plus large d'une recherche sur la « Décision collaborative dans les systèmes distribués appliquée à la e-maintenance ». Nous présentons ici une partie des résultats obtenus dans une logique de répartition des ressources immatérielles et, plus particulièrement, des connaissances nécessaires en maintenance et d'évaluation de leurs performances.

L'article est organisé en quatre parties. Nous définissons d'abord le contexte des travaux avec les éléments qui permettent de modéliser des situations de e-maintenance. Nous présentons ensuite une synthèse bibliographique où nous résumons les avancées de recherche dans les différents champs rattachés à notre problème. Nous proposons ensuite une modélisation des situations de maintenance et la formalisation de l'engagement des ressources immatérielles afférentes. Enfin, nous étudions plus précisément la répartition des connaissances avant de conclure sur la portée de ce travail.

2. Contexte de l'étude

2.1. Fonction maintenance et point de vue de l'étude

Nous considérons dans cette étude des interventions de maintenance quelconques (actions correctives, préventives...). Suivant le point de vue du responsable de maintenance, l'environnement du mainteneur en intervention peut être considéré comme composé des éléments de la figure 1. Nous avons retenu le domaine manufacturier (ateliers de production) pour cadre applicatif car il constitue un cadre assez générique correspondant à notre expertise des milieux industriels. Nous avons ainsi pu appréhender les enjeux et contraintes d'un service de maintenance.

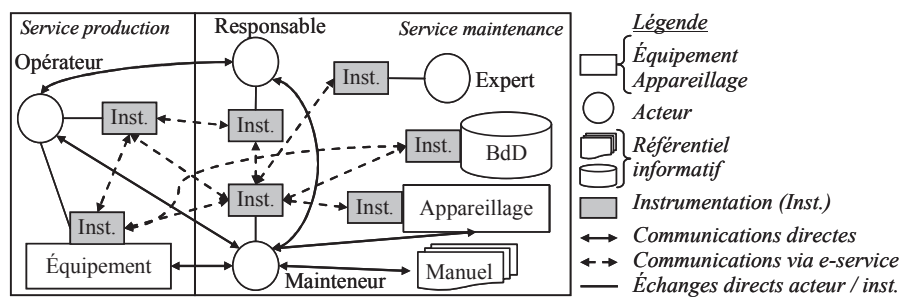


Figure 1. Cadre du mainteneur en intervention

Le responsable de maintenance a pour mission d'organiser les travaux de maintenance répondant au mieux aux différentes contraintes provenant de l'environnement, des besoins de ses clients et de sa hiérarchie.

Ces interventions associent, le plus souvent, un service de production et un service de maintenance, impliquant un ensemble de ressources humaines, matérielles et immatérielles nécessaires à leur bon déroulement.

Parmi les acteurs, nous distinguons les acteurs de maintenance (mainteneur, expert et responsable) et de production (opérateur qui travaille habituellement sur l'équipement à maintenir).

Les moyens physiques requis : appareillages, outils et outillages et, bien sûr, les pièces de rechange, forment les ressources matérielles. Nous désignons par appareillage les équipements de mesure et de diagnostic. Les outils et outillages sont les ressources utilisées par le mainteneur pour intervenir sur l'équipement (démontage, remontage...).

Les ressources immatérielles sont les données brutes ou traitées, les connaissances et les compétences nécessaires au traitement des interventions et à l'utilisation efficace des ressources matérielles. Un paragraphe dédié aux ressources immatérielles permettra de préciser ces éléments (voir paragraphe 4.3).

L'intégration des nouveaux outils de travail issus des TIC fait apparaître une instrumentation des ressources, tant matérielles qu'immatérielles, portant sur les technologies d'accès et de traitement de données, d'informations ou de connaissances et de communication et d'échange entre acteurs à distance.

2.2. Niveaux AFNOR de maintenance

Pour distinguer les interventions de maintenance, nous nous appuyons sur la décomposition proposée par la norme AFNOR X 60-000 (Norme AFNOR X 60-000, 2002). Cinq niveaux sont proposés, différant par le degré de complexité des ressources matérielles et immatérielles engagées (tableau 1).

Cette décomposition des interventions par niveau servira pour caractériser les besoins en ressources lors d'une intervention.

<i>Définition simplifiée</i>	<i>Détails par niveau des actions selon la norme AFNOR</i>	
<i>Action s'effectuant sur le matériel</i>	1^{er} niveau	Intervention de réglage simple, prévu par le constructeur Remplacement de consommables Échange d'équipements accessibles en toute sécurité Reprise légère (de peinture)
	2^e niveau	Dépannage par échange standard Contrôle de bon fonctionnement Intervention mineure de maintenance préventive Concept du LRU (Lowest Replaceable Unit) : matériel à maintenir en urgence
<i>Action s'effectuant en dehors du matériel</i>	3^e niveau	Intervention hors matériel réalisée dans l'atelier ordinaire Identification et diagnostic de pannes Réparation par échange de composants fonctionnels Réparation mécanique mineure Programmation d'éléments simples Concept du SRU (Single Replaceable Unit) : élément interchangeable d'une unité

	4^e niveau	Intervention de type spécialisé Réglage d'instruments de mesure Vérification d'étalons Travaux importants de maintenance corrective ou préventive
<i>Intervention de grande maintenance</i>	5^e niveau	Travaux importants de rénovation ou de reconstruction Retour en usine ou en atelier central de maintenance Intervention de grande maintenance Remise à neuf

Tableau 1. *Classification des actions de maintenance*

2.3. Positionnement dans le cadre normatif ISO 9004

Anticipant sur l'exploitation possible des résultats de cette étude et sur leur instanciation en entreprise, nous avons choisi de mener celle-ci dans le cadre structuré de la norme ISO 9004 (Norme ISO 9004, 2000). Par ce choix, nos développements sont conformes aux standards employés par de nombreuses entreprises pour la mise en place de référentiels, documents génériques... permettant de garantir l'adhésion de celles-ci dans l'hypothèse d'une exploitation industrielle future. De plus, la norme ISO offre un formalisme de spécification des processus d'une organisation et une décomposition avec plusieurs niveaux d'analyse dont, notamment, celui du responsable de maintenance.

La norme ISO distingue trois types de processus pour toute organisation :

- un processus de réalisation permettant de répondre aux besoins des « clients »,
- des processus support qui apportent un soutien technique, informatique... aux activités du processus de réalisation,
- un processus de pilotage visant à mesurer les performances globales et à adapter les règles de management et les objectifs.

Le processus de réalisation, objet de nos travaux, est celui de la maintenance. Nous l'assimilons à un processus de maintenance générique, formé de six étapes élémentaires (au niveau de détail considéré). Ces étapes représentent le déroulement d'une intervention de maintenance, tant préventive que corrective, sur un équipement (Pérès *et al.*, 2006) et sont communes à tout scénario (figure 2).

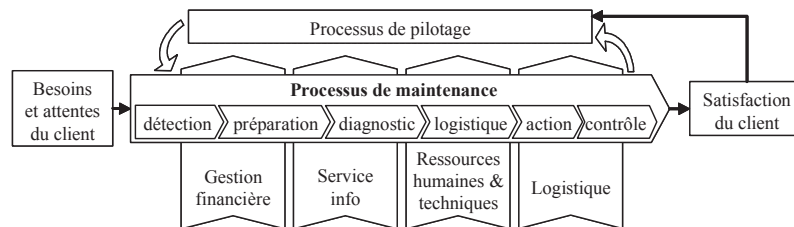


Figure 2. Modélisation processus du contexte d'étude

Différents processus support sont possibles : on trouve, bien sûr, les ressources humaines et matérielles qui font l'objet de nos travaux mais aussi le service informatique (assurant le fonctionnement des TIC), la gestion financière (prise en compte des coûts) ou la logistique (pièces de rechange), processus distribués qui peuvent aider à la réalisation de la maintenance.

2.4. Évaluation des performances de la maintenance

La modélisation ISO et les enjeux du responsable de maintenance placent les attentes du client en tête des contraintes de performance du service de maintenance. Les performances souhaitées par le client concernent essentiellement le résultat des interventions et le fonctionnement des équipements à maintenir. Nous pouvons traduire les attentes du client en termes de qualité des interventions.

La qualité d'une intervention de maintenance est conditionnée par une succession d'étapes qui conduisent à la remise en fonctionnement de l'équipement maintenu. Ces étapes concernent la détection, le diagnostic, la réparation... (figure 2) et, pour chacune, le déroulement dépend de la disponibilité des connaissances et des compétences nécessaires (ressources immatérielles).

Une connaissance incomplète ou une indisponibilité de compétence va entraîner une dégradation du résultat, voire l'absence de résultat. Les ressources immatérielles constituent ainsi une composante clef des interventions de maintenance et de leur performance.

La performance d'une intervention est établie à partir du résultat de l'intervention et de la manière dont ce résultat est obtenu. Trois aspects sont considérés, mettant en jeu les objectifs visés, les moyens engagés et les résultats obtenus d'une intervention. L'efficacité met ainsi en évidence l'adéquation entre objectifs et résultats, l'efficience entre résultats et moyens et la pertinence entre moyens et objectifs.

La notion d'efficacité correspond bien aux attentes du client : il souhaite la remise en fonctionnement des équipements. La notion d'efficience est privilégiée par le responsable de maintenance puisqu'il est chargé de gérer les ressources de

maintenance, en minimisant leur utilisation. La notion de pertinence est d'un intérêt plus stratégique et permet notamment de prévoir l'organisation et le dimensionnement de la structure en évitant un engagement de ressources inutiles avec des coûts injustifiés.

Nos travaux vont considérer ces différents aspects avec l'évaluation du résultat de l'intervention via les indicateurs classiques de maintenance (MTBF : mean time between failure ou MTTR : mean time to repair, par exemple), l'évaluation de l'efficacité des ressources immatérielles engagées et de la pertinence des interventions.

2.5. Apports du e-service en maintenance

Les TIC se composent des technologies d'accès et de manipulation de l'information (ordinateurs, PDA (Personal Digital Assistant)...) et des technologies de communication qui permettent d'échanger des informations en prenant appui sur des réseaux divers (Internet...). Leur emploi dans le monde industriel vise à améliorer la performance des systèmes, en contribuant à la communication et à l'accès aux informations. Plusieurs effets sont attendus :

- une meilleure communication lors de l'intervention,
- une facilité d'accès aux connaissances nécessaires à l'intervention,
- un appui à l'organisation décisionnelle du système,
- la mise en place ou l'amélioration d'échanges collaboratifs,
- une diminution des contraintes spatiales,
- une réduction des temps de transfert.

En contrepartie, les TIC provoquent souvent des bouleversements au niveau de l'organisation décisionnelle, de la répartition des compétences des acteurs, de leur pouvoir décisionnel... engendrant des effets indésirables, comme, par exemple :

- un risque de surinformation,
- un manque de fiabilité des informations disponibles,
- une dégradation de la productivité engendrée par les difficultés d'appropriation de nouveaux outils par les acteurs,
- un bouleversement des échanges provoquant des modifications de l'organisation et de la structure décisionnelle.

Malgré ces effets négatifs, l'intégration des TIC au sein d'une organisation de maintenance peut être motivée en vue :

- d'un renforcement du cadre de mission de l'acteur local et de son rôle grâce à l'appui de ressources immatérielles externalisées,

- d'une optimisation dans l'organisation du travail par une répartition des ressources adaptée.

2.6. Modélisation de la problématique étudiée

Par la modélisation processus, nous avons mis en évidence les supports dont le processus de maintenance peut bénéficier. Pour les ressources immatérielles, ces aides peuvent être étendues via le e-service (figure 3) qui permet un accès à des appuis délocalisés, distants du lieu d'intervention.

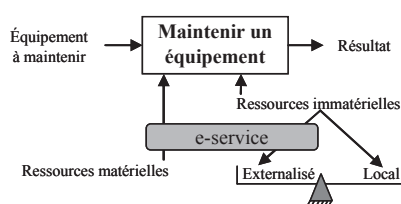


Figure 3. Modélisation d'une activité de maintenance

Sur la figure 3, les entrées / sorties de l'activité « maintenir un équipement » correspondent :

- pour l'entrée, à la requête d'une intervention préventive ou curative sur un équipement,
- pour la sortie, au résultat de l'activité. Ce résultat, reflet de la qualité de l'intervention, peut correspondre à quatre cas : équipement non réparé, remise en état de fonctionnement dégradé, conforme ou bonifié.

Nous considérons qu'une remise en état de fonctionnement conforme nécessite un niveau « nominal » de connaissances et de compétences. Par référence, un résultat dégradé correspondra à une indisponibilité partielle des connaissances et / ou compétences et un résultat bonifié sera associé à un renforcement des connaissances et / ou compétences.

Les acteurs (opérateur, mainteneur, expert et responsable) interviendront tant au niveau des ressources matérielles (par l'activation de ces ressources) qu'au niveau des ressources immatérielles (par l'apport des connaissances et compétences qu'ils représentent).

Les TIC offrent plusieurs possibilités :

- le « rapatriement » en local de ressources immatérielles externalisées (bases de données, consultation d'expert...) et, à l'inverse, la consultation à distance, d'informations locales...,
- le télépilotage à distance de ressources matérielles locales.

Le e-service peut également aider à la mise à disposition des ressources matérielles nécessaires en maintenance (Kaffel, 2001) avec, par exemple, la commande de pièces de rechange à distance, la réservation d'appareillage de mesure...

Ainsi, en maintenance préventive, le e-service peut jouer un rôle essentiel dans la réalisation des précédentes étapes décrites dans le processus de maintenance de la figure 2, par une aide à la surveillance et à la détection via des moyens de contrôle distribués ; en maintenance corrective, son rôle peut être étendu à toutes les étapes du processus correctif en aidant la consultation de ressources ou l'action à distance.

De nombreux travaux traitant de la disponibilité, du partage, de l'affectation et du pilotage des ressources matérielles ont déjà été menés (Aghezzaf *et al.*, 2007), (Elegbede *et al.*, 2003), (Fiori *et al.*, 2006), (Ivanov *et al.*, 2003) ; ces problèmes ne seront donc pas considérés dans cet article.

Nous allons focaliser notre étude sur les ressources immatérielles et sur la problématique de répartition entre le mode local et le mode externalisé des connaissances et compétences. La performance d'une activité est indexée à la disponibilité des connaissances et des compétences requises pour sa réalisation ; les critères coûts et délais peuvent compléter cette caractérisation.

Nous rappelons que l'exploitation des TIC offre la possibilité d'utiliser, au-delà des ressources disponibles localement, certaines, distantes, qui pourront compléter utilement le potentiel engagé. Il devient possible de « distribuer » les connaissances et les compétences requises pour une activité de maintenance entre le mode local, lié à l'opérateur, et le mode externalisé, correspondant à des acteurs de compétence plus élevée.

La distribution des ressources immatérielles requises pour une activité de maintenance induit la notion de collaboration entre acteurs. Cette notion se réfère à un travail en groupe, avec l'objectif d'une décision commune. Le travail collaboratif est lié ici à la possibilité, pour un acteur local, de bénéficier de l'expertise d'autres acteurs externalisés. La répartition des ressources immatérielles engagées et, notamment, des connaissances va engendrer une collaboration plus ou moins importante entre acteurs locaux et externalisés. La collaboration est liée au taux d'externalisation des ressources immatérielles de maintenance.

Nous orientons nos travaux vers une étude des apports des TIC pour la disponibilité des ressources immatérielles influençant l'organisation des travaux de maintenance, tout en respectant les contraintes de performance du client. Nous allons focaliser sur la définition d'un cadre d'évaluation visant à modéliser les ressources immatérielles puis à étudier la répartition des connaissances nécessaires aux activités de maintenance par exploitation du e-service.

3. Synthèse bibliographique

Nous résumons dans ce paragraphe les résultats de plusieurs travaux de recherche menés dans les différents champs thématiques liés à la problématique considérée et qui ont guidé nos développements.

Globalement, six champs forment le cadre de notre travail : l'évaluation de performance en général, les métiers de la maintenance, les technologies TIC, le travail collaboratif, l'ingénierie des connaissances et les mécanismes décisionnels.

De nombreux travaux de recherche ont été menés dans le domaine général de l'évaluation des performances. Ces travaux traitent notamment de la performance dans les systèmes industriels, proposant des méthodes d'implantation d'indicateurs, des exemples appliqués étudiant la performance des systèmes physiques..., comme, par exemple, (Cérutti *et al.*, 1992). Dans (Berrah, 2002), l'auteur propose une définition assez complète de la notion d'indicateurs en offrant différentes pistes pour établir des indicateurs pertinents en reprenant également les trois critères d'évaluation classique : coût, délai, qualité. Les auteurs de (Bennour *et al.*, 2007) proposent une approche différente en prenant en considération la dimension humaine lors de l'évaluation des performances et en reliant les compétences des acteurs aux performances des activités. Néanmoins, il apparaît un manque au niveau de l'évaluation des performances issues des TIC, de leurs fonctionnalités technologiques ou encore des apports de communication et d'accessibilité qu'ils engendrent.

Dans le domaine de la maintenance, la littérature est conséquente. De nombreux travaux de recherche ont été menés sur la maintenance, la maintenance distribuée (Kaffel, 2001) et les politiques et stratégies associées ainsi que sur leur modélisation, suivant un objectif d'optimisation (Pérès *et al.*, 2006). Des travaux concernant l'utilisation des TIC en maintenance existent comme, par exemple, (Tararykine, 2005) même si les développements se placent plutôt à un niveau opérationnel d'intégration, sans aborder les impacts organisationnels et humains des TIC. Il existe aussi des projets visant à mettre au point des plates-formes génériques de e-maintenance, à partir des technologies Internet, comme, par exemple, les projets PROTEUS (Bangemann *et al.*, 2006) et NEMOSYS (Bressy *et al.*, 2005). Toutefois, ces travaux n'intègrent pas les « changements d'organisation » provoqués par l'intégration des TIC en maintenance.

Sur les TIC, la littérature est, là aussi, assez fournie puisqu'il existe de nombreuses références traitant principalement du développement d'architectures logicielles, de méthodologies d'implantation, des effets positifs sur les organisations et des échanges d'informations. Citons, par exemple, (Kalay, 2006) qui étudie les impacts des TIC sur le travail en collectif et les échanges au sein de groupes, en concluant que les TIC facilitent la collaboration et la communication. Dans une autre direction, les travaux de Le Parc (Le Parc *et al.*, 2004) abordent la supervision et le contrôle à distance en productique, par le biais du réseau Internet. Cependant, les

effets négatifs, les changements causés par les TIC au niveau des modes de travail ou encore les risques de fonctionnement dégradé que les TIC peuvent occasionner en cas de défaillance ne sont que rarement évoqués.

Dans le domaine du travail collaboratif, les travaux existants proposent des architectures collaboratives ou des logiciels collaboratifs comme, par exemple, (Villemur *et al.*, 2003). D'autres travaux présentent des classifications de ces différents types d'outils collaboratifs comme (Betbeder, 2003). Les mécanismes collaboratifs s'avèrent complexes à modéliser, notamment, suite aux bouleversements organisationnels provoqués par l'intégration des TIC. Cette difficulté se traduit par un manque de résultats sur ce point. Cependant, certains auteurs, comme (Kvan, 2002), définissent un modèle de processus collaboratif, en le particularisant au domaine de la conception.

De nombreux travaux de recherche assimilent les ressources immatérielles aux connaissances et compétences et considèrent qu'elles sont un des enjeux majeurs des entreprises actuelles. Citons, par exemple, les travaux de Harzallah (Harzallah *et al.*, 2002) ou encore ceux de Grundstein (Grundstein, 2000) qui contribuent à ce courant de recherche. D'autres travaux, comme ceux de Robin (Robin *et al.*, 2007) abordent la relation essentielle entre connaissances et travail collaboratif, dans le domaine de la conception.

Sur les processus décisionnels, des travaux concernent des outils d'aide à la décision comme, par exemple, (Monsarrat, 2005) mais peu d'auteurs s'intéressent à l'étude des mécanismes décisionnels. Citons néanmoins (Cauvin, 2005) qui aborde la problématique des mécanismes décisionnels et de leurs enjeux, assez difficiles à modéliser.

Un premier bilan de cette étude est que la littérature ne propose pas d'outil unique permettant d'avoir l'ensemble des vues nécessaires au traitement de notre problème. Aussi, nous devons associer plusieurs supports de modélisation pour mener les développements permettant d'atteindre les objectifs visés.

Pour cela, notre attention a été retenue par :

- la modélisation processus selon la norme ISO 9004 qui propose un cadre générique et appliqué dans de nombreuses entreprises (Norme ISO 9004, 2000) et que nous avons déjà décrite,
- l'approche UML qui permet de modéliser un problème de façon standard suivant la formalisation objet (UML 2, 2005),
- la formalisation GRAI qui offre une sémantique de modélisation de la décision (Roboam, 1993),
- les systèmes multi-agents qui constituent un outil de simulation de scénarios et de comportements d'acteurs (Ferber, 1995).

Nous ne considérerons ici que les langages de modélisation nécessaires à la formalisation des ressources immatérielles engagées en maintenance et à l'évaluation des effets de leur répartition.

4. Cadre d'évaluation de performance

Nous présentons, dans ce paragraphe, les éléments de formalisation des situations de e-maintenance et leur performance, en termes :

- de collaboration et d'échange entre le site local et les ressources externalisées,
- de composants représentatifs des interventions de maintenance,
- de ressources immatérielles, influant sur la performance d'une intervention.

4.1. Formalisation des situations de e-maintenance

4.1.1. Primitives de collaboration

Dans un environnement de maintenance « instrumenté TIC », le mainteneur peut communiquer et échanger avec l'ensemble des acteurs et / ou moyens en vue d'améliorer et / ou de réaliser l'intervention sur l'équipement à maintenir. Cet apport issu de bases de données (données, informations, connaissances) ou d'acteurs (connaissances, expériences) doit permettre de « consolider » la prise de décision et d'améliorer la qualité des interventions et des résultats.

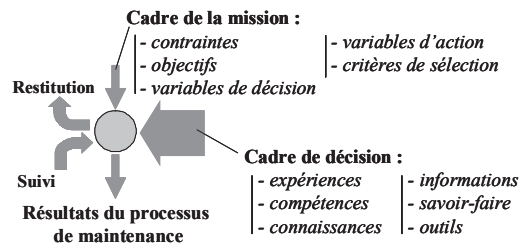


Figure 4. Représentation d'un centre de décision

Pour cette modélisation, nous nous sommes appuyés sur le formalisme de la méthode GRAI qui permet de modéliser l'aspect décisionnel des systèmes (Roboam, 1993). Nous retenons le cadre descriptif des centres de décision (CD) auxquels peuvent être assimilés les acteurs de maintenance. Nous avons étendu la description du centre de décision en complétant le cadre de mission (ordres, objectifs fixés par le niveau hiérarchique supérieur...) et le cadre de décision (expériences, compétences...) de manière à mettre en exergue les connaissances et compétences

détenues par les acteurs ou stockées dans les bases de données et qui permettent de construire la décision (figure 4) (Garcia *et al.*, 2006).

Au niveau de la décision collaborative, nous avons identifié une primitive de collaboration qui permet de distinguer trois cas types de collaboration (Garcia *et al.*, 2007) :

- décision en local (figure 5) : le mainteneur bénéficie d'appuis extérieurs renforçant son cadre de décision tout en gardant le pouvoir décisionnel,
- décision externalisée : la décision du mainteneur est externalisée : un autre acteur ou expert décide à la place du mainteneur,
- décision multiacteur : plusieurs acteurs dont le mainteneur mettent en commun certaines de leurs connaissances et compétences ; ils sont assimilés à un groupe avec une mission commune conduisant à une décision commune.

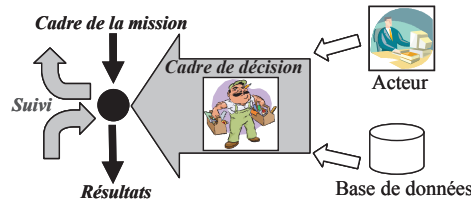
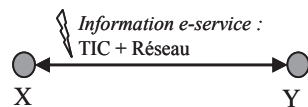


Figure 5. Collaboration avec une décision « en local »

Nous aborderons dans le paragraphe 5.1 la corrélation entre cette primitive de collaboration et les possibilités de répartition des connaissances.

4.1.2. Primitives d'échange

Le second type de primitives identifié concerne les échanges. Nous avons considéré qu'un échange peut être caractérisé par un émetteur, un lien d'échange et un récepteur (figure 6).



6a. Primitive d'échange

Entités paramétrables	Déclinaisons possibles
Émetteur / Récepteur (X / Y)	acteurs, équipement à maintenir, référentiel de l'entreprise, appareillage et outillage.
Lien e-service	réseau, instrumentation TIC.

6b. Déclinaisons de la primitive d'échange

Figure 6. Caractérisation de la primitive d'échange

Cette primitive a permis de mettre en évidence plusieurs types d'échanges, selon la nature de l'émetteur et du récepteur engagés et du lien d'échange via le e-service.

Nous matérialisons ainsi le moyen d'accéder à des ressources délocalisées et le risque de dégradation de la qualité des activités de maintenance en cas d'échec du e-service.

4.2. Modélisation objet

Nous avons modélisé les situations étudiées à l'aide du langage objet UML retenu pour ses avantages de modélisation générique.

A l'aide d'UML, nous avons formalisé le cadre d'étude (figure 7) avec les éléments de base identifiés dans la figure 1 décrivant une situation générique de maintenance (figure 7a). Les classes de base sont l'acteur, l'équipement, le référentiel informatif et les appareillages / outillages. Nous avons complété cette base par (figure 7b) :

- une classe « instrumentation » pour modéliser les fonctionnalités TIC (outils de communication, d'accès et de manipulation d'information),
- une classe relationnelle « réseau », pour les liens d'échange entre les différentes entités constituantes de ces situations.

L'ensemble de ces classes permet de représenter n'importe quelle situation de e-maintenance et d'en spécifier les caractéristiques par l'intermédiaire de leurs attributs. L'instanciation de ces classes à une situation quelconque de maintenance fait apparaître plusieurs types d'acteurs (mainteneur, expert...), de référentiels informatifs (base de données, informations papier...), de catégories d'équipements (machines outils, matériels de manutention...), d'appareillage (mesure, diagnostic...) et d'outillage (montage, démontage...).

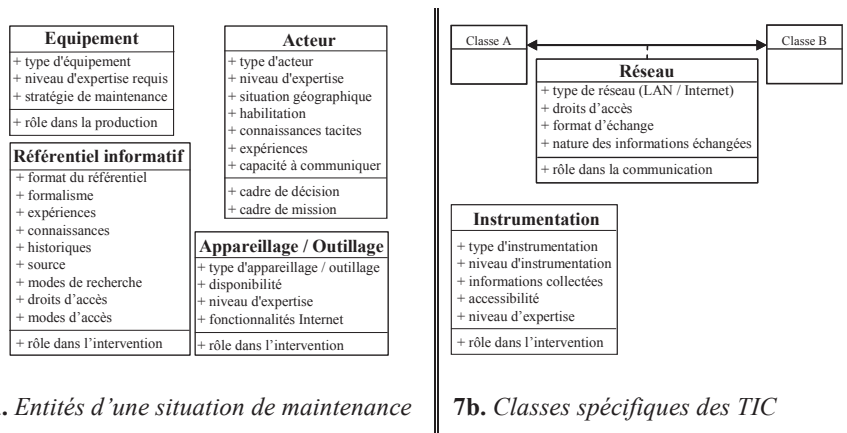


Figure 7. Classes décrivant une situation élémentaire de e-maintenance

Cette première approche de spécification des classes objets peut être complétée par l'exploitation d'autres diagrammes UML : diagrammes de classes, de communication, de séquence et de cas d'utilisation. Les potentialités offertes par ces diagrammes ont permis de formaliser et de caractériser la situation étudiée.

Par exemple, les diagrammes de classes (figure 8) ont permis de décrire plus finement les composants intervenant en maintenance ainsi que les technologies TIC en modélisant les instrumentations et le réseau employés.

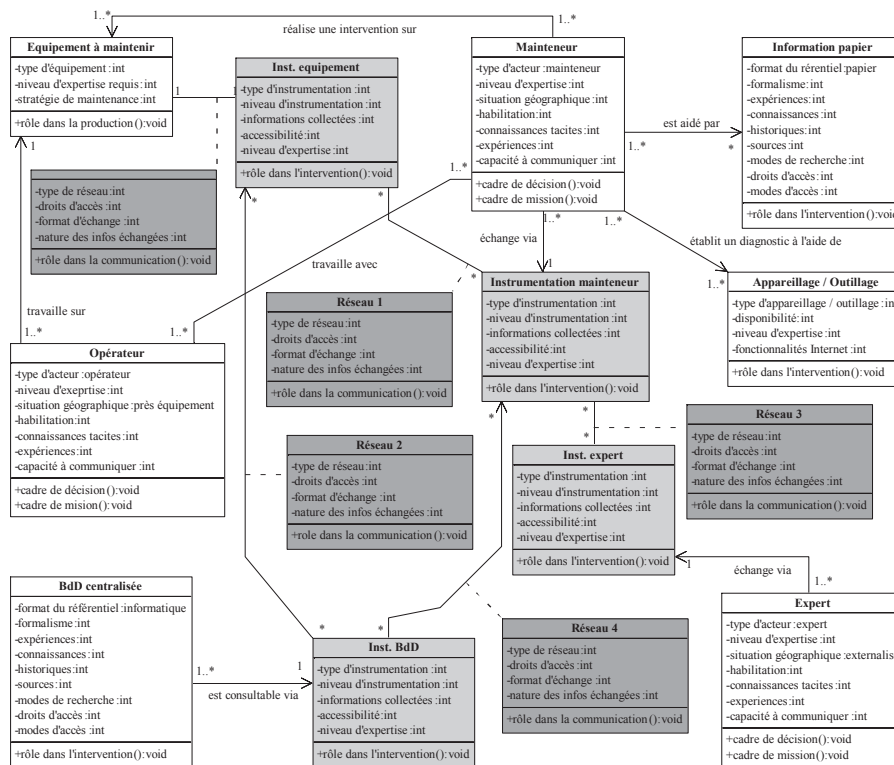


Figure 8. Diagramme de classes décrivant une situation de maintenance

À partir des descriptions formalisées à l'aide des classes et des diagrammes de classes, nous avons identifié les caractéristiques et les fonctions de chaque entité impliquée dans une intervention de maintenance. Les développements de modélisation menés avec UML nous ont permis de mettre en évidence les éléments clefs de la performance que représentent les ressources immatérielles avec les connaissances et compétences et qui font l'objet du paragraphe suivant.

4.3. Caractérisation des ressources immatérielles : connaissances et compétences

Nos travaux ayant pour objectif de formuler et d'évaluer la répartition des ressources immatérielles, il est nécessaire de caractériser ces ressources en précisant les différentes notions leur faisant référence et de présenter une modélisation de ces ressources.

4.3.1. Quelques définitions

La connaissance peut être définie comme un ensemble des représentations, idées ou perceptions acquises dans le cadre de formations et / ou par l'expérience (Norme AFNOR X 50-183, 2002).

Polanyi (Polanyi, 1966) distingue les connaissances tacites, détenues par des acteurs, de celles explicites, formalisées sous diverses formes de stockage (papier, numérique...). La formalisation par des bases de données peut concerner : des procédures, des instructions, des données brutes ou structurées, des informations, des connaissances..., mais aussi des historiques des pannes passées, des expériences de résolution de défaillances...

La compétence est une « aptitude démontrée à mettre en œuvre des connaissances et savoir-faire » (Norme ISO 9001, 2000). La norme AFNOR (Norme AFNOR X 50-183, 2002) précise que la compétence est une « capacité à mettre en œuvre des connaissances, savoir-faire et comportements en situation d'exécution ».

Un savoir-faire est une « mise en œuvre maîtrisée d'un savoir et d'une habileté pratique dans une réalisation spécifique » ; de même, un savoir-être est un « savoir-faire relationnel » (Norme AFNOR X 50-183, 2002).

La notion de compétence doit être complétée par celles de compétence acquise lorsqu'elle est détenue par un acteur et de compétence requise lorsqu'elle est nécessaire pour une activité, une mission, un processus... (Norme ISO 9001, 2000).

Distinguons les notions de connaissance et de compétence. La compétence n'est que la mise en application de connaissance, savoir-faire ou savoir-être. Un acteur peut posséder une compétence, sans pour autant détenir la connaissance associée. De même, un acteur peut détenir une connaissance, sans être capable de l'appliquer.

4.3.2. Caractérisation des ressources immatérielles : aspect qualitatif et aspect quantitatif

Une organisation telle la fonction maintenance d'une entreprise s'appuie sur différentes formes de connaissances et de compétences. Ces ressources immatérielles sont présentes sur des supports de nature hétérogène et correspondent à différents niveaux de formalisation (Dieng, 1998) :

- non formalisées : ressources immatérielles tacites,

- peu formalisées : documents non informatisés, uniquement sous forme de documents papier,
- quasiment formalisées : documents informatiques, mais selon des formats hétérogènes,
- formalisées : systèmes de base de cas, de connaissances (pouvant être centralisés ou distribués).

Elles peuvent être de nature numérique, graphique, textuelle, symbolique et correspondre à des règles de décision, des expressions mathématiques, des modélisations diverses (UML, SADT...).

Dans ce contexte, il apparaît nécessaire d'avoir une approche de caractérisation des ressources immatérielles qualitative associée à une approche quantitative afin d'appréhender complètement ces ressources et leurs enjeux.

4.3.2.1. Aspect qualitatif

Sur le plan qualitatif, la caractérisation des ressources immatérielles se base sur un inventaire des différentes caractéristiques de ces dernières, permettant de distinguer les éléments critiques, essentiels au déroulement d'une activité. La réalisation de cet inventaire nécessite l'utilisation de techniques dédiées, propres à la gestion des connaissances.

La littérature dans le domaine de la gestion des connaissances et des compétences est assez riche et offre une certaine diversité de méthodes, modèles et référentiels permettant d'inventorier ces ressources. Nous avons choisi d'utiliser le modèle des compétences CRAI (Competency Resource Aspect Individual) proposé par (Harzallah *et al.*, 2002) ; ce modèle permettant de cartographier les compétences et ses différentes composantes (connaissances, savoir-faire et savoir-être), présente un caractère générique, instanciable à notre domaine d'étude qu'est la maintenance.

Il s'agit d'un modèle global de la compétence qui permet de décomposer les compétences en connaissances, savoir-faire et savoir-être, au sein du même modèle ; il permet de spécifier différents aspects contextuels des compétences et d'exprimer les compétences requises pour accomplir une mission et les compétences acquises par les acteurs.

L'application de ce modèle à notre étude permet de formaliser les compétences nécessaires, présentes au sein du service de maintenance, en intégrant les enjeux et les contraintes spécifiques au domaine de la maintenance (figure 9).

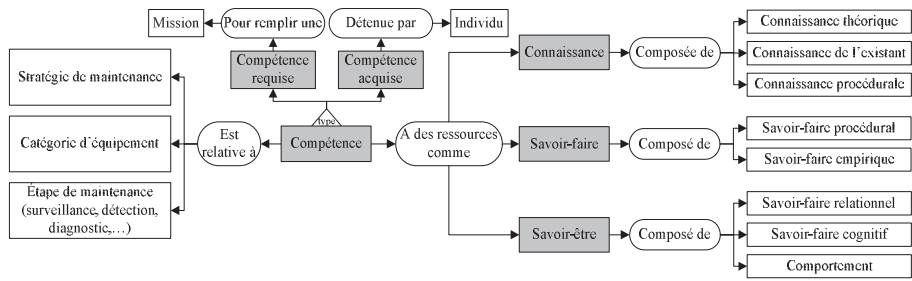


Figure 9. Application du modèle de Harzallah dans notre contexte d'étude

À partir du modèle conceptuel de la figure 9, nous pouvons établir un modèle relationnel (figure 10), permettant de construire une base de données en inventoriant compétences, connaissances (K), savoir-faire (SF) et savoir-être (SE), caractérisés par des références uniques et des attributs dédiés comparables à ceux établis à l'aide de la modélisation UML.

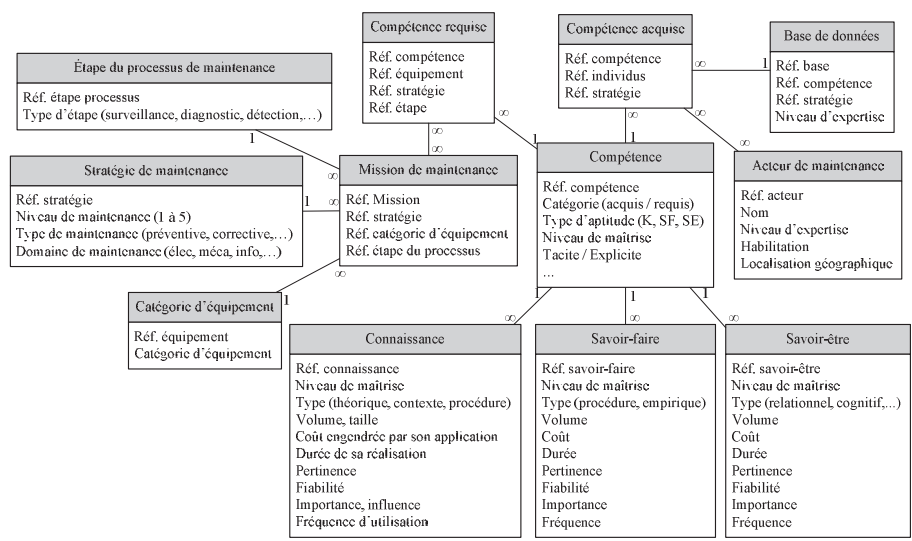


Figure 10. Modèle relationnel des compétences de maintenance

REMARQUE. — Ce type de modélisation relationnelle offre une garantie d'adaptabilité à des contextes informatisés de type gestion de maintenance (GMAO) ou gestion d'entreprise (ERP...) existants.

Le modèle relationnel de la figure 10 est complémentaire du diagramme de classes de la figure 8. Ce diagramme présentait une description générale d'une

situation de maintenance, sans détailler les aspects connaissances et compétences même si ces notions apparaissent au niveau des attributs de certaines classes d'objets (sources d'information, acteur...). Le modèle des compétences de la figure 10 décrit de manière plus détaillée la situation des ressources immatérielles ; les autres éléments de représentation permettent de particulariser ces ressources : domaine de maintenance (mécanique, électrique, informatique...), niveau de maintenance (tableau 1), type de stratégie (préventive, corrective...).

Certaines des caractéristiques décrites sont prépondérantes :

- fréquence d'utilisation : une connaissance fréquemment utilisée sera maintenue en local car son indisponibilité, en cas d'interruption du e-service, aurait un impact important sur la performance du résultat de maintenance,
- importance : une compétence indispensable pour telle intervention doit être disponible pour l'acteur réalisant l'intervention,
- niveau de maîtrise : une connaissance nécessitant un niveau de maîtrise élevé est associée à un acteur qualifié (non présent en local) et externalisée auprès de l'expert ; de plus, les connaissances de niveau élevé sont peu fréquemment utilisées,
- niveau de complexité de l'intervention (tableau 1),
- disponibilité des acteurs de maintenance, selon leur niveau d'expertise,
- délais et coûts d'attente et de mise à disposition des connaissances.

Ces caractéristiques des ressources immatérielles permettent d'appréhender les connaissances et compétences sur le plan qualitatif et de les évaluer en vue d'en réorganiser la répartition dans le service de maintenance. L'évaluation pourra être multicritère (par utilisation d'une méthode adaptée, comme la somme pondérée) ou s'appuyer sur une méthode d'agrégation conduisant à un indicateur synthèse.

4.3.2.2. Aspect quantitatif

La quantification des connaissances et des compétences est moins facile à établir. En effet, une connaissance est un concept difficile à « matérialiser » donc à « mesurer ». Définir une quantité de connaissance ou de compétence revient à établir une « unité de granularité », permettant son traitement, dépendant de plusieurs facteurs :

- le domaine de l'étude de l'ensemble des connaissances étudiées,
- la nature, a priori, hétérogène des connaissances manipulées,
- le formalisme de représentation,
- le niveau d'analyse (individuel, collectif ou organisationnel).

Ces facteurs peuvent contribuer à l'établissement d'une échelle de caractérisation et guider la quantification des connaissances (tableau 2), inspirée des travaux de Merlo et Girard (Merlo, 2004).

<i>Niveau de décomposition</i>	<i>Descriptif du niveau</i>
1 : CE : connaissance élémentaire	Connaissance non décomposable
2 : CC : connaissance composée	Composée de connaissances élémentaires
3 : TR : transformation simple	Relations élémentaires
4 : IN : instruction	Composée des niveaux précédents
5 : PR : procédure	Composé d'instructions
6 : PG : programme	Ensemble des connaissances du service de maintenance

Tableau 2. *Niveaux de décomposition des connaissances*

La quantification des compétences peut être envisagée de la même manière que celle des connaissances. À une compétence est associé un niveau de maîtrise (de débutant à expert, par exemple) décrivant simplement la mise en pratique de connaissances, savoir-faire ou savoir-être. Ainsi, les mêmes niveaux de décomposition peuvent être associés aux compétences. À un niveau de compétence correspond l'application de connaissances, réparties entre les six niveaux du tableau 2.

Un service de maintenance est formé d'un ensemble de connaissances et de compétences qu'il devient ainsi possible de quantifier à l'aide de ces six niveaux, du niveau global du service de maintenance (niveau 6) jusqu'à leur niveau élémentaire (niveau 1). Cette distinction de niveaux peut être prise en compte dans le modèle relationnel de la figure 10.

5. Étude de la distribution des connaissances

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à la répartition des connaissances entre le mode local et le mode externalisé (via les TIC) et à l'impact de la perte du e-service sur les performances des interventions de maintenance.

Si nous avons jusqu'ici distingué connaissances et compétences parmi les ressources immatérielles, nous avons également constaté de fortes analogies tant en modélisation qu'en traitement. C'est pour cela que nous ne considérons, pour la suite, que l'analyse de la répartition des connaissances. Les mêmes traitements pourront être envisagés dans des formes similaires pour l'analyse de la répartition des compétences.

5.1. Modélisation du problème de répartition des connaissances

L'étude de la disponibilité des connaissances nécessite une formulation pratique de la répartition des connaissances entre les différents acteurs. Cette répartition des

connaissances de maintenance, faite entre les différents acteurs (opérateurs, mainteneurs et experts) et les bases de données, peut correspondre à un véritable problème d'optimisation de performance du processus de maintenance sous-jacent.

L'objectif est de trouver le meilleur équilibre entre l'ensemble des connaissances locales et l'ensemble des connaissances externalisées, accessibles via les fonctionnalités du e-service.

Les connaissances nécessaires aux interventions peuvent être distribuées entre les deux cas extrêmes : tout en mode local ou tout en mode externalisé (figure 11).

Diverses configurations de répartition sont possibles.

Du point de vue du responsable du service de maintenance, l'ensemble des connaissances du service de maintenance (K_T) pourra être réparti entre les sous-ensembles K_{TL} (connaissances locales) et K_{TE} (connaissances externalisées) suivant :

$$K_T = K_{TL} + K_{TE} \quad [1]$$

$$\text{avec : } K_{TE} = a * K_T \text{ et } K_{TL} = (1-a) * K_T,$$

a : taux de connaissances externalisées.

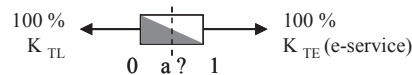


Figure 11. Problématique de répartition des connaissances

L'analyse des mécanismes décisionnels collaboratifs initiée au paragraphe 4.1.1, nous a conduit à étudier différentes configurations de répartition. Le cas où la majorité des ressources est laissée en local sera caractéristique d'une décision locale (figure 5). Par opposition, une part importante de connaissances externalisées va correspondre à une collaboration avec une décision soit externalisée, si l'acteur distant prend le pouvoir décisionnel, soit multiacteur, dans le cas d'un travail collaboratif entre le mainteneur et l'acteur distant.

Dans la suite de cet article, nous allons chercher à évaluer les effets de cette répartition à l'aide des indicateurs de résultat de coût et durée en considérant le résultat de l'intervention en termes de performance selon que l'équipement est non réparé ou a retrouvé un état de fonctionnement conforme, dégradé ou bonifié.

5.2. Formulation de la répartition des connaissances

Nous allons formuler le problème de la répartition de connaissances entre K_{TL} (local) et K_{TE} (externalisées) sous la forme d'un problème d'optimisation abordable avec les outils classiques de programmation linéaire.

La première étape de formalisation du problème est essentielle ; elle consiste à exprimer celui-ci sous la forme d'un système d'équations à résoudre, composé d'une fonction objectif à optimiser et de contraintes à respecter. Pour établir ce système, il faut identifier les variables d'influence, le domaine d'application et ses bornes.

Pour notre étude, nous avons considéré les méthodes classiques de programmation linéaire utilisant les outils de base, tels ceux présentés dans (Bierlaire, 2006). Nous avons également pris exemple sur des travaux appliqués à la maintenance (Kaffel, 2001).

Une intervention de maintenance peut être classée dans l'un des cinq niveaux de maintenance (tableau 1). La connaissance totale disponible dans un service de maintenance K_T correspond à la totalité des connaissances des cinq niveaux de maintenance (tableau 1) :

$$K_T = K_{T1} + K_{T2} + K_{T3} + K_{T4} + K_{T5}, \text{ soit : } K_T = \sum_{i=1}^5 K_{Ti} \quad [2]$$

Une analyse fréquentielle (liée au taux d'utilisation de la connaissance) permettrait déjà de guider les choix d'optimisation. Les connaissances des niveaux 1 et 2 sont généralement les plus couramment utilisées car elles concernent les interventions de maintenance les plus fréquentes.

Ainsi, la plupart des connaissances engagées par l'opérateur de production ou le mainteneur de premier niveau sont généralement « locales ». A contrario, les connaissances spécifiques, plus complexes, sont souvent détenues par des mainteneurs de niveau supérieur ou des experts externalisés. Malgré ceci, le choix d'affecter ces connaissances en local ou de les externaliser reste complexe : il dépend de plusieurs facteurs caractérisant les connaissances (abordés au paragraphe 4.3), les connaissances disponibles par rapport à celles requises et le e-service (couverture du réseau, fiabilité des instrumentations TIC...).

Pour l'ensemble du service de maintenance, nous pouvons définir les connaissances K_{TL} et K_{TE} , selon les niveaux i de connaissance, les connaissances au niveau i notées K_{Ti} et les taux de connaissances K_{Ti} externalisées notés a_i :

$$K_{TL} = \sum_{i=1}^5 (1 - a_i) * K_{Ti} \quad [3]$$

$$K_{TE} = \sum_{i=1}^5 a_i * K_{Ti} \quad [4]$$

NOTE. — $a=0$ signifie que la connaissance est instanciée à 100 % en mode local.

La distinction entre mode local et mode externalisé est directement dépendante du point de référence considéré, ici l'équipement à maintenir. Ainsi, la connaissance K_5 , liée aux interventions en atelier central est externalisée par rapport à la zone d'actions sur l'équipement en situation (localisé chez le client). L'atelier central devient le mode local pour le 5^e niveau.

L'exploitation d'une structure de coût distinguant le coût de la connaissance en local (c_L) et le coût de la connaissance externalisée (c_E) permet d'établir le coût total d'un service de maintenance C_T associé à la mise en place de la connaissance K_T et de ses composantes K_{TL} et K_{TE} :

$$C_T = c_L * K_{TL} + c_E * K_{TE} \quad [5]$$

En première approche, le critère de durée peut être défini de manière similaire à celui du coût. La notion de « durée » doit être obligatoirement précisée en fonction des interventions considérées pour que cet indicateur ait un rôle effectif. Nous obtenons la durée totale D_T en fonction de la connaissance totale K_T et de ses composantes K_{TL} et K_{TE} :

$$D_T = d_L * K_{TL} + d_E * K_{TE} \quad [6]$$

D_T et C_T sont des indicateurs qui permettent d'évaluer la performance des connaissances lors de leur répartition, afin de déterminer leur efficience (notion précisée au paragraphe 2.4).

Nous rappelons que les coûts et durées abordés ici sont relatifs aux connaissances et à leur accessibilité pour le mainteneur et concernent seulement la mise à disposition des connaissances nécessaires aux interventions. Nous ne prenons pas en compte l'ensemble des coûts relatifs à la fonction maintenance.

De plus, il est également possible de tenir compte des coûts propres à chaque niveau de connaissances c_{Li} et c_{Ei} (ou des durées d_{Li} et d_{Ei}), selon le mode d'exploitation en local ou externalisé. Ces coûts c_i sont liés au niveau ; généralement, plus le niveau est élevé, plus le coût est élevé. Nous pouvons donc écrire, sous forme condensée, les coûts et durées totaux :

$$C_T = \sum_{i=1}^5 K_{Ti} * [c_{Li} * (1 - a_i) + c_{Ei} * a_i] \quad [7]$$

$$D_T = \sum_{i=1}^5 K_{Ti} * [d_{Li} * (1 - a_i) + d_{Ei} * a_i] \quad [8]$$

avec : $1 \leq i \leq 5$, selon les cinq niveaux de maintenance (tableau 1),

c_{Li} : coût de disponibilité des connaissances K_{TLi} en local,

c_{Ei} : coût de disponibilité des connaissances K_{TEi} externalisées,

d_{Li} : durée de disponibilité des connaissances K_{TLi} en local,

d_{Ei} : durée de disponibilité des connaissances K_{TEi} externalisées,

K_{Ti} : connaissance totale de niveau i ,

a_i : taux de connaissances K_{TEi} externalisées.

REMARQUE. — Suivant les cas, la différence entre coût local et coût externalisé peut être positive ou négative. Ainsi, la différence Δc_i ($\Delta c_i = c_{Li} - c_{Ei}$) sera positive si la mise à disposition de la connaissance en local (engagement acteur, apprentissage, mise à jour...) a un coût supérieur au fait de l'externaliser en ayant recours au e-service. Dans le cas contraire, l'accès et la gestion de connaissances externalisées via les TIC engendrent des coûts plus élevés que ceux d'un mainteneur en local aidé seulement de la documentation technique.

Nous donnons sur la figure 12 une répartition entre K_{Int} (connaissances requises pour une intervention donnée) et K_{Act} (connaissances détenues par les acteurs de maintenance) afin d'affecter les connaissances nominales nécessaires à un niveau d'intervention donné. Cette répartition fait apparaître une distribution des connaissances souvent effectuée entre l'opérateur, le mainteneur de 1^{er} niveau, le mainteneur de 2^e niveau et l'expert.

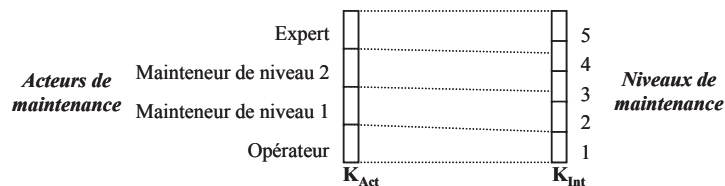


Figure 12. Exemple d'affectation des connaissances des acteurs

D'autres expressions de K_T peuvent être établies en exploitant de manière combinée les modes de décomposition précédemment décrits.

Le problème type consiste à optimiser une fonctionnelle propre à la solution de répartition des connaissances sous des conditions limites. Il s'agit alors d'optimiser certaines variables en jouant sur les taux de connaissances K_{Ti} externalisées (a_i).

Les contraintes intervenant dans la formalisation du problème peuvent être classées en deux catégories :

- contraintes générales,
- contraintes dépendant d'une stratégie déterminée de maintenance.

Les contraintes générales concernent essentiellement les coûts et les durées, avec la possibilité de limiter certains indicateurs, selon les budgets alloués (C_{max}) et les contraintes temporelles d'intervention (D_{max}) :

$$C_T \leq C_{max} \quad \text{et} \quad D_T \leq D_{max} \quad [9]$$

avec : C_T et D_T définis respectivement par les expressions [7] et [8] et C_{max} et D_{max} les limites correspondantes. Les seuils fixés pour C_T et D_T permettent de

garantir une valeur minimale de durée et de coût à ne pas dépasser pour limiter l'indisponibilité de l'équipement maintenu et son coût de possession.

Les contraintes dépendant de la stratégie choisie pour le système de maintenance vont concerner les aspects à privilégier tant sur le plan de la répartition entre le mode local et le mode externalisé que sur celui de l'utilisation des connaissances.

Plusieurs formulations du problème sont possibles. Les situations les plus courantes sont :

- pour une connaissance donnée, minimiser le coût engagé, avec la garantie d'une durée d'intervention limitée,
- pour un coût donné, maximiser le volume de connaissances accessibles (soit au niveau du service, soit pour une intervention particulière).

Une autre expression du problème peut concerner le niveau de connaissance engagée par rapport à un niveau nominal. Parmi les quatre cas de remise en fonctionnement évoqués au paragraphe 2.6, le niveau nominal de connaissance correspond aux connaissances nécessaires pour remettre un équipement dans un état de fonctionnement conforme. De même, une remise en état bonifié peut être la conséquence d'un niveau de connaissance supérieur au niveau nominal.

La démarche suivie peut être transposée à l'analyse de la connaissance nominale engagée pour une intervention I (K_{NI}). La corrélation entre les connaissances nominales et les connaissances totales du service (K_T) peut être exprimée par l'expression [10] :

$$K_T = n_{int} * K_{NI} \quad [10]$$

avec : K_{NI} : connaissances nominales requises pour une intervention donnée,

K_T : connaissances totales du service de maintenance,

n_{int} : coefficient d'intervention traduisant la part de K_T composant K_{NI} pour une intervention I donnée ($n_{int} < 1$).

5.3. Évolution en cas de perte du e-service

Comme tout système supporté, la qualité des interventions de maintenance peut évoluer avec celle des fonctionnalités du e-service et être fortement pénalisée par l'occurrence de défaillances du réseau (rupture, difficulté d'accessibilité...).

Si nous considérons, par exemple, les connaissances nominales (K_{NI}) pour une intervention I, celles-ci peuvent être exprimées suivant :

$$K_{NI} = K_{NIL} + K_{NIE} \quad [11]$$

avec : K_{NI} : connaissance nominale nécessaire à une intervention,

K_{NIE} : connaissance nominale externalisée : $K_{NIE} = a * K_{NI}$,

K_{NIL} : connaissance nominale en local : $K_{NIL} = (1-a) * K_{NI}$,
 a : taux de connaissances externalisées ($0 \leq a \leq 1$).

Désignons par x la probabilité de perte des fonctionnalités du e-service. Nous exprimons la connaissance effectivement disponible K_{eff} par :

$$K_{eff} = K_{NIL} + (1-x) * K_{NIE}$$

$$K_{eff} = (1-a) * K_{NI} + (1-x) * a * K_{NI} , \text{ soit : } K_{eff} = K_{NI} * (1 - a * x) \quad [12]$$

Nous pouvons déduire de [12] la courbe d'évolution de la performance effective illustrée sur le schéma de la figure 13. Cette courbe correspond à l'évolution de K_{eff} en fonction de x , pour K_{NI} donnée et différentes valeurs de a .

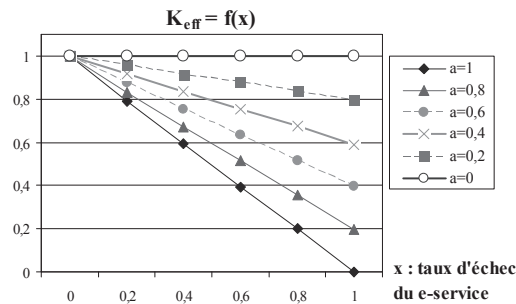


Figure 13. Évolution des connaissances effectives

Les tracés lient directement la performance effective au taux de connaissances externalisées ou au taux d'échec du e-service. Cette performance peut également être interprétée comme un pourcentage d'interventions résolues. Par exemple, pour un taux de connaissances externalisées de 0,4 et pour un taux d'échec du e-service de 0,2, environ 90 % des interventions sont résolues.

Ce type de tracé permet déjà d'aborder les problèmes de localisation / délocalisation des connaissances en termes de taux d'interventions résolues et donc de performance des équipements. Ainsi, pour garantir un niveau de performance des équipements, avec un taux d'échec du e-service connu, il faut déterminer le pourcentage limite de connaissances à externaliser. Par exemple, pour garantir environ 90 % de performance des équipements, avec un taux d'échec du e-service de 0,4, il faut au maximum externaliser 20 % des connaissances ($a=0,2$), au-delà, la performance ne sera plus garantie.

L'approche proposée peut être étendue via un simulateur générique ou spécifique, permettant d'envisager plusieurs acteurs de maintenance, des répartitions des connaissances entre le mode local et le mode externalisé.

Dans cette logique, nous avons développé un simulateur spécifique présenté dans (Garcia *et al.*, 2008) qui permet de paramétrer plusieurs stratégies de déploiement

des connaissances et d'en quantifier les performances. Différents paramétrages sont offerts sur :

- le caractère tacite (acteurs) ou explicite (bases de données) des connaissances,
- le niveau de connaissances de 1 à 5,
- leur localisation en mode local ou en mode externalisé,
- la disponibilité des acteurs et du réseau.

Par ces fonctionnalités, le simulateur permet d'appréhender des situations réalistes, de considérer différents scénarios d'intervention et par suite de confronter les performances obtenues.

Nous donnons, en illustration, sur les tracés de la figure 14, l'évolution du taux d'utilisation des connaissances en mode local, en fonction de variations des paramètres x et a . Ce taux correspond à la valeur moyenne de la part de connaissances locales intervenant dans la réalisation des interventions.

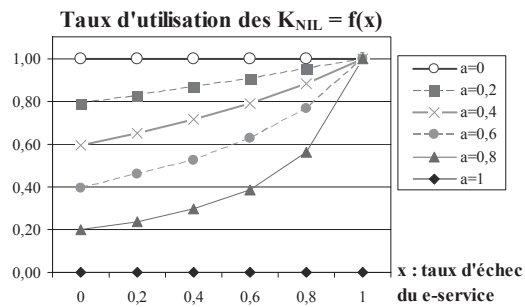


Figure 14. Évolution du taux d'utilisation des connaissances locales

Il est évident que les traitements d'optimisation qui ont considéré une expression essentiellement symbolique des connaissances devront s'appuyer sur l'unité de caractérisation associant l'aspect quantitatif et l'aspect qualitatif et abordée au paragraphe 4.3.

6. Conclusion

Nous avons proposé dans cet article un cadre d'évaluation des performances de la e-maintenance. Pour cela, nous avons d'abord modélisé et formalisé les situations de e-maintenance en proposant des primitives de collaboration et d'échanges. Nous avons également défini des classes concernant les composants élémentaires des situations de maintenance. Nous avons ensuite caractérisé les ressources immatérielles en distinguant les connaissances, des compétences, puis abordé les notions de qualification et de quantification de ces dernières. La dernière étape de

ces travaux a consisté à analyser plus finement la répartition des connaissances et le taux d'échec du e-service en étudiant les performances du service de maintenance et les impacts sur son organisation.

Des travaux d'extension de ces résultats sont en cours, au niveau notamment d'une démarche « d'optimisation » de l'engagement des TIC, démarche qui passe par l'optimisation de la répartition de l'ensemble des ressources immatérielles (connaissances et compétences) entre le mode local et le mode externalisé.

Une analyse stratégique du déploiement des ressources immatérielles est également envisagée, exploitant le simulateur évoqué en fin de paragraphe 5.3, afin d'établir des règles de bonnes pratiques de l'engagement des TIC dans des situations industrielles. Ces règles apporteront une aide au responsable de maintenance dans l'organisation de son service préfigurant une démarche d'optimisation de la performance de la fonction maintenance suite à l'intégration des technologies TIC.

7. Bibliographie

- Aghezzaf E. H., Jamali M. A., Ait-Kadi D., « Production, Manufacturing and Logistics - An integrated production and preventive maintenance planning model », *European Journal of Operational Research*, vol. 181, n° 2, 2007, p. 679-685.
- Bangemann T., Rebeuf X., Reboul D., Schulze A., Szymanski J., Thomesse J.-P., Thron M., Zerhouni N., « PROTEUS - Creating distributed maintenance systems through an integration platform », *Computers in Industry*, vol. 57, n° 6, 2006, p. 539-551.
- Bennour M., Crestani D., « Using competencies in performance estimation: from the activity to the process », *Computers in Industry*, vol. 58, n° 2, 2007, p. 151-163.
- Berrah L., *L'indicateur de performance : concepts et applications*, Ed. Cépaduès, 2002.
- Betbeder-Matibet M. -L., *Symba : un environnement malléable support d'activités collectives en contexte d'apprentissage*, Thèse de doctorat, Université du Maine, 2003.
- Bierlaire M., *Introduction à l'optimisation différentiable*, Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2006.
- Bressy P., Zerhouni N., Allemant C., Leger J.-B., « Application du concept de e-maintenance à un système naval de défense : NEMOSYS », *Colloque international francophone PENTOM'05*, Marrakech, Maroc, Avril 2005.
- Cauvin A., *Analyse, modélisation et amélioration de la réactivité des systèmes de décision dans les organisations industrielles*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, 2005.
- Cérutti O., Gattino B., *Indicateurs et tableaux de bord*, Ed. AFNOR, Série Gestion, Qualité, 1992.

- Dieng R., Corby O., Giboin A., Ribière M., « Methods and Tools for Corporate Knowledge Management », *Proceedings of the Eleventh Workshop on Knowledge Acquisition KAW'98*, Banff, Alberta, Canada, Avril 1998.
- Elegbede C., Adjallah K., « Availability allocation to repairable systems with genetic algorithms: a multi-objective formulation », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 82, n° 3, 2003, p. 319-330.
- Ferber J., *Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective*, InterEditions, 1995.
- Fiori de Castro H., Lucchesi Cavalca K., « Maintenance resources optimization applied to a manufacturing system », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, n° 4, 2006, p. 413-420.
- Garcia A., Noyes D., « Impact des technologies d'information et de communication sur un système décisionnel : cas de la maintenance », *6e conférence francophone MOSIM'06*, Rabat, Maroc, Avril 2006, p. 1110-1119.
- Garcia A., Noyes D., Clermont P., « Knowledge distribution in e-maintenance activities », *IFIP TC8/WG8.3 International Conference on Collaborative Decision Making CDM'08*, Toulouse, France, Juillet 2008.
- Garcia A., Noyes D., Clermont P., « Performances des situations de e-maintenance », *7e Congrès International de Génie Industriel CIGI'07*, Trois-Rivières, Québec, Canada, Juin 2007.
- Grundstein M., *Le Management des Connaissances de l'Entreprise: Problématique, Axe de progrès, Orientations, Rapport de recherche*, MG Conseil, Réf. #050010, 2000.
- Harzallah M., Vernadat F., « IT-based competency modeling and management: from theory to practice in enterprise engineering and operations », *Computers in Industry*, vol. 48, n° 2, 2002, p. 157-179.
- Ivanov A., Varnier C., Zerhouni N., « Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué », *4e Conférence Francophone MOSIM'03*, Toulouse, France, Avril 2003.
- Kaffel H., *La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre*, Thèse de doctorat, Université de Laval. Québec, 2001.
- Kalay Y. E., « The impact of information technology on design methods, products and practices », *Design Studies*, vol. 27, n° 3, 2006, p. 357-380.
- Kvan T., « Collaborative design: What is it? », *Automation in construction*, vol. 9, n° 4, 2000, p. 409-415.
- Le Parc P., Vareille J., Marcé L., « E-productique ou contrôle et supervision distante de systèmes mécaniques sur l'Internet », *JESA, Revue des Systèmes*, vol. 38, n° 5, 2004, p. 525-558.
- Merlo C., Girard P., « Information system modelling for engineering design co-ordination », *Computers in Industry*, vol. 55, n° 3, 2004, p. 317-334.
- Monsarrat E., Briand C., Esquirol P., « Aide à la décision pour une coopération interentreprise », *JESA, Revue des Systèmes*, vol. 39, n° 7, 2005, p. 799-818.

- Norme AFNOR X 60-000, *Maintenance industrielle – Fonction maintenance*, Paris, Ed. AFNOR, Mai 2002.
- Norme AFNOR X 50-183, *Outils de management - Ressources humaines dans un système de management de la qualité - Management des compétences*, Paris, Ed. AFNOR, Juillet 2002.
- Norme ISO 9001 X50-131, *Systèmes de Management de la qualité, Exigences*, 2000.
- Norme ISO 9004, *Système de management de la qualité - Lignes directrices pour l'amélioration des performances*, 2000.
- Pérès F., Noyes D. « Envisioning e-logistics developments making spare parts in situ and on demand – State of art and guidelines for future developments », *Computers in Industry*, vol. 57, n° 6, 2006, p. 490-503.
- Polanyi M., *The tacit Dimension*, London, Routledge & Kegan Paul Ltd, 1966.
- Robin V., Rose B., Girard P., « Modelling collaborative knowledge to support engineering design project manager », *Computers in Industry*, vol. 58, n° 2, 2007, p. 188-198.
- Roboam M., *La méthode GRAI*, Ed. Teknea, 1993.
- Tararykine V., *Modélisation des flux d'information dans un système de e-maintenance*, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2005.
- UML 2, Document collectif, *Unified Modeling Language 2.0 : Superstructure*, 2005.
- Villemur T., Rodriguez Peralta L. M., Drira K., « Conception d'un service de gestion de session orienté modèle pour des groupes collaboratifs synchrones », *10ème Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles, CFIP'2003*, Paris, France, 2003, p. 33-49.