



HAL
open science

DÉCISION COLLABORATIVE DANS LES SYSTÈMES DISTRIBUÉS - APPLICATION A LA E-MAINTENANCE

Anne Seguy

► **To cite this version:**

Anne Seguy. DÉCISION COLLABORATIVE DANS LES SYSTÈMES DISTRIBUÉS - APPLICATION A LA E-MAINTENANCE. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2008. Français. NNT: . tel-04529449v1

HAL Id: tel-04529449

<https://theses.hal.science/tel-04529449v1>

Submitted on 3 Apr 2009 (v1), last revised 2 Apr 2024 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Institut National Polytechnique de Toulouse*

Discipline ou spécialité : *Systèmes Industriels*

Présentée et soutenue par **ANNE SEGUY** (née GARCIA)

INGÉNIEUR ENI

Le 5 décembre 2008

DÉCISION COLLABORATIVE DANS LES SYSTÈMES DISTRIBUÉS
–
APPLICATION À LA E-MAINTENANCE

JURY

M. Patrick BURLAT	Professeur à l'EMSE	Président de jury
M. Jean-Paul BOURRIÈRES	Professeur à l'Université de Bordeaux I	Rapporteur
M. Benoît IUNG	Professeur à l'Université Henri Poincaré de Nancy	Rapporteur
M. Philippe CLERMONT	Maître de Conférences à l'ENIT	Membre
M. Daniel NOYES	Professeur à l'ENIT	Directeur de thèse
Mme Pascale ZARATÉ	Maître de Conférences – HDR à l'ENSIACET / INPT	Membre

École doctorale : *Systèmes*

Unité de recherche : *Laboratoire Génie de Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes*

Directeur(s) de Thèse : *M. Daniel NOYES*

À Sébastien

À Monique et Michel

"Confronté à la roche, le ruisseau l'emporte toujours, non par la force mais par la persévérance"

H. Jackson Brown

"Que diable allait-il faire dans cette galère ?"

Molière, les fourberies de Scapin

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein de l'équipe Production Automatisée du Laboratoire Génie de Production (LGP) de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes.

Avant de commencer ce mémoire, je tiens à remercier ici les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, au déroulement et à la finalisation de mes travaux de thèse :

- M. Daniel NOYES, Professeur à l'ENIT, directeur de thèse et directeur du laboratoire LGP, qui m'a fait partager sa passion de la recherche et qui m'a soutenue et aidée tout au long de ces travaux,
- M. Jean-Paul BOURRIÈRES, Professeur à l'Université de Bordeaux I, et M. Benoît IUNG, Professeur à l'Université Henri Poincaré de Nancy, pour avoir accepté de rapporter ces travaux et avoir pris de leur temps pour me faire des remarques pertinentes qui ont permis d'améliorer ces travaux et leur restitution,
- Mme Pascale ZARATÉ, Maître de Conférences – HDR à l'ENSIACET / INP de Toulouse, pour avoir accepté de participer au jury de présentation de ces travaux,
- M. Patrick BURLAT, Professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, pour avoir accepté de présider ce jury de thèse,
- M. Philippe CLERMONT, Maître de Conférences à l'ENIT, qui a participé à l'encadrement de mes travaux et avec qui la collaboration n'a pas toujours été simple.

Je tiens également à remercier l'ensemble de mes collègues du laboratoire et, en particulier, de l'équipe PA, Laurent, Bernard, Thierry qui ont aidé à l'élaboration de ces travaux, et bien sûr Vincent, Arnaud, Roberta, Mathieu, Toufic, Cédric, Paul, ... qui ont ponctué de bons moments ces années de thèse.

Je ne saurais terminer cet avant-propos sans remercier mes proches qui m'ont apporté leur soutien tout au long de ces années :

- mon mari qui a toujours été là pour me remonter dans les moments difficiles,
- ma famille, et, en particulier, mes parents qui ont toujours cru en moi et à qui je dois beaucoup.



TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	5
Introduction	6
I.1 La fonction maintenance	6
<i>I.1.1 Concepts et définitions</i>	<i>6</i>
I.1.1.1 Définitions de la fonction maintenance.....	6
I.1.1.2 Interaction de la maintenance et de la production.....	9
<i>I.1.2 Stratégies et méthodes de maintenance</i>	<i>9</i>
I.1.2.1 Stratégies classiques de maintenance.....	9
I.1.2.2 Diversité des activités composant les interventions de maintenance.....	10
I.1.2.3 Méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance.....	10
I.1.2.4 Modes de gestion de la maintenance.....	11
<i>I.1.3 Enjeux actuels de la maintenance</i>	<i>11</i>
I.1.3.1 Nouvelles formes de maintenance.....	11
I.1.3.2 Gestion des ressources de maintenance.....	14
I.1.3.3 Organisation, compatibilité de la maintenance avec la production.....	15
I.1.3.4 Amélioration des techniques préventives.....	15
I.1.3.5 Instrumentation de la maintenance : quelques applications.....	15
I.2 Les Technologies d'Information et de Communication (TIC)	16
<i>I.2.1 Définitions des TIC et du e-service</i>	<i>17</i>
<i>I.2.2 Cartographie des outils issus des TIC</i>	<i>17</i>
<i>I.2.3 Effets des TIC</i>	<i>18</i>
<i>I.2.4 Utilisation et intégration des TIC en maintenance</i>	<i>20</i>
I.3 La décision collaborative	21
<i>I.3.1 La décision</i>	<i>21</i>
I.3.1.1 Définitions de base de la décision.....	21
I.3.1.2 Processus décisionnel.....	22
I.3.1.3 Courants de recherche en décision.....	24
I.3.1.4 Systèmes associés à la décision.....	26
<i>I.3.2 Le travail collaboratif</i>	<i>26</i>
I.3.2.1 Différentes formes de travail collectif : coopération vs collaboration.....	27
I.3.2.2 Modes de collaboration.....	31
I.3.2.3 Outils de collaboration.....	32
I.3.2.4 Courants de recherche en travail collaboratif.....	33
<i>I.3.3 Le mécanisme étudié dans nos travaux : la décision collaborative</i>	<i>34</i>
I.3.3.1 Concepts fondamentaux : définitions et processus existants.....	35
I.3.3.2 Travaux actuels en décision collaborative.....	37
I.3.3.3 Décision collaborative en maintenance.....	38
I.3.3.4 Proposition de formalisation de la décision collaborative.....	38
Conclusion	39
CHAPITRE II. LES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE ET LEUR ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL	41
Introduction	42
II.1 Contexte des travaux	42

II.2 Cadre de formalisation processus	43
II.2.1 Choix de la modélisation processus	43
II.2.2 Cadre normatif ISO et approche processus	44
II.2.3 Cartographie des processus	45
II.2.4 Modélisation processus de la maintenance	46
II.3 Modélisation objet des activités de e-maintenance	49
II.3.1 Principes de la modélisation objet	49
II.3.1.1 Présentation de l'approche objet	49
II.3.1.2 Travaux existants réalisés avec la modélisation objet et UML	49
II.3.2 Application d'UML aux activités de e-maintenance	51
II.3.2.1 Identification de classes	51
II.3.2.2 Modélisations UML des activités de e-maintenance	55
II.4 Évaluation de la performance des activités de e-maintenance	65
II.4.1 Identification de groupes d'indicateurs de performance	66
II.4.2 Indicateurs de performance	66
Conclusion	70
CHAPITRE III. LES ACTIVITÉS DE DÉCISION COLLABORATIVE ET LEUR RÉORGANISATION	71
Introduction	72
III.1 Compléments bibliographiques	72
III.1.1 Organisation décisionnelle et centre de décision	72
III.1.1.1 Typologie des systèmes décisionnels	72
III.1.1.2 Centre de décision (CD)	74
III.1.2 Méthode GRAI	76
III.1.2.1 Présentation	76
III.1.2.2 Règles décisionnelles	77
III.1.3 Évolutions de GRAI	78
III.2 Situations types de décision collaborative	79
III.2.1 Décision monoacteur	80
III.2.1.1 Décision locale	80
III.2.1.2 Décision externalisée	81
III.2.2 Décision multiacteur	81
III.3 Analyse de la collaboration de centres de décision	83
III.3.1 Principe de collaboration de CD	83
III.3.2 Caractérisation d'un CDC	85
III.3.2.1 Cadre général	85
III.3.2.2 Besoin origine de la collaboration	86
III.3.2.3 Persistance des cadres de mission	86
III.3.2.4 Horizon et période du CDC	87
III.3.2.5 Types de regroupement de CD	87
III.3.2.6 Règles décisionnelles	89
III.3.2.7 Synthèse	89
III.3.3 Application à la e-maintenance	91
III.3.3.1 Cadre général	92
III.3.3.2 Besoin origine	92
III.3.3.3 Persistance des cadres de mission initiaux	92
III.3.3.4 Horizon et période	93
III.3.3.5 Types de regroupement	93
III.3.4 Synthèse	93
III.4 Ressources immatérielles	94
III.4.1 Positionnement par rapport aux travaux existants	94
III.4.1.1 Définitions de base	94
III.4.1.2 Outils et techniques de modélisation existants	95
III.4.2 Caractérisation des ressources immatérielles	98

III.4.2.1 Aspect qualitatif	98
III.4.2.2 Aspect quantitatif	100
Conclusion	101
CHAPITRE IV. FORMULATION DES PERFORMANCES EN E-MAINTENANCE	103
Introduction	104
IV.1 Formulation théorique des performances en e-maintenance	104
IV.1.1 Répartition des ressources nécessaires en e-maintenance	105
IV.1.2 Performance et disponibilité des ressources immatérielles	106
IV.1.3 Démarche de répartition des ressources immatérielles	107
IV.1.3.1 Approche statique	109
IV.1.3.2 Approche dynamique	114
IV.2 Principes de simulation	116
IV.2.1 Composants des simulations	117
IV.2.2 Règles de déroulement des simulations	117
IV.2.2.1 Traitement des interventions par les catégories d'acteurs	117
IV.2.2.2 Caractéristiques des catégories d'acteurs	118
IV.2.3 Formalismes retenus pour la simulation	121
IV.2.4 Compléments bibliographiques	121
IV.3 Modélisation par réseaux de Petri	122
IV.3.1 Élaboration du modèle RdP	122
IV.3.1.1 Outil de simulation utilisé	123
IV.3.1.2 Mécanismes élémentaires	123
IV.3.1.3 Modèle de simulation	125
IV.3.1.4 Principes de simulation	126
IV.3.2 Étude de sensibilité	127
IV.3.2.1 Évolution du temps moyen de traitement des interventions	128
IV.3.2.2 Variations de λ_{TIC} pour différentes valeurs de μ_{TIC}	130
IV.3.2.3 Variations de α_{Ai+1} pour différentes valeurs de β_{Ai+1}	131
IV.3.2.4 Variations de λ_{TIC} pour différentes valeurs de α_{Ai+1}	132
IV.3.3 Extensions du RdP	133
IV.3.3.1 Variations des taux de réparation μ_A , μ_B et μ_C	133
IV.3.3.2 Étude stratégique	134
IV.3.4 Synthèse du RdP	135
IV.4 Modélisations dédiées	136
IV.4.1 Modélisation objet	136
IV.4.1.1 Principe et objectif du simulateur MKBS	136
IV.4.1.2 Règles de simulation des scénarios	137
IV.4.1.3 Simulations des scénarios de e-maintenance	138
IV.4.1.4 Synthèse du simulateur MKBS	143
IV.4.2 Modélisation par systèmes multiagents	144
IV.5 Règles de bonnes pratiques	145
IV.5.1 Premier niveau	145
IV.5.2 Second niveau	147
Conclusion	148
CONCLUSION GÉNÉRALE	151
BIBLIOGRAPHIE	155
Références bibliographiques	155
Publications personnelles	168
ANNEXE. SYSTÈMES MULTIAGENTS	A-1

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Tableau I.1. Classification des actions de maintenance [Afnor 02]	8
Tableau I.2. Ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance	8
Figure I.1. Différentes stratégies de maintenance	9
Figure I.2. Représentation de l'activité de e-maintenance	12
Figure I.3. Trois déclinaisons de l'organisation spatiale d'un système de maintenance	14
Figure I.4. Cartographie des TIC selon les services correspondants	18
Tableau I.3. Classification des effets des TIC au sein d'une organisation	19
Tableau I.4. Apports du e-service à la maintenance corrective [Pérès 06]	20
Tableau I.5. Définitions de la décision	21
Figure I.5. Processus décisionnel de Simon [Simon 77]	23
Figure I.6. Cycle de la décision de Courbon [Courbon 82]	23
Figure I.7. Processus décisionnel de Lavergne [Lavergne 83]	23
Figure I.8. Modèle DTL (Decision Time Line) [Stal 00]	24
Figure I.9. Processus décisionnel de Cauvin [Cauvin 05]	24
Tableau I.6. Récapitulatif des racines étymologiques et des définitions [Robert 04]	27
Tableau I.7. Différents courants ayant contribué à distinguer les formes de travail collectif	28
Figure I.10. Distinction de la coopération et de la collaboration [George 01]	28
Tableau I.8. Définition de la coopération, la coordination et la collaboration [Winer 94]	29
Tableau I.9. Nos définitions des formes de travail en groupe	31
Figure I.11. Trois modes de collaboration [Tarpin 97]	32
Tableau I.10. Classification des modes de collaboration selon les critères temps et espace	32
Figure I.12. Modèle des 3 C [Ellis 91]	33
Figure I.13. Modèle du processus de conception collaborative [Kvan 00]	36
Figure I.14. Modèle du processus de conception collaborative [Chiu 02]	36
Figure I.15. Modèle du processus de décision collective [Laborie 06]	36
Figure II.1. Cadre du mainteneur en intervention	42
Tableau II.1. Détail des normes de la série 9000 relatives à l'approche processus	44
Figure II.2. Représentation transversale des processus	45
Figure II.3. Vision processus de la maintenance	46
Figure II.4. Représentation des processus de maintenance selon la norme ISO 9001	47
Figure II.5. Processus d'intervention de maintenance	48
Figure II.6. Mise en évidence des processus clés intervenant en e-maintenance	48
Figure II.7. Classes élémentaires des activités de maintenance	51
Figure II.8. Classe décrivant les sollicitations d'intervention de maintenance	53
Figure II.9. Classes dédiées TIC	54
Figure II.10. Diagramme de classes	56
Figure II.11. Diagramme d'objets	57
Figure II.12. Diagramme de déploiement	58
Figure II.13. Diagramme de cas d'utilisation	59
Figure II.14. Diagramme d'activités	60

Figure II.15. Diagramme de séquence sans e-service.....	61
Figure II.16. Diagramme de séquence avec e-service.....	62
Figure II.17. Diagramme de communication	63
Figure II.18. Identification de groupes de performance.....	66
Tableau II.2. Indicateurs de performance P_{PI} du pilotage	67
Tableau II.3. Indicateurs de performance P_{DE} des données d'entrée	67
Tableau II.4. Indicateurs de performance P_{DS} des données de sortie	68
Tableau II.5. Indicateurs de performance P_{RMat} des ressources matérielles	68
Tableau II.6. Indicateurs de performance des ressources immatérielles (P_{RLocal} et P_{RExt}).....	68
Tableau II.7. Indicateurs de performance du support TIC (P_{TIC}).....	69
Figure III.1. Vision systémique d'une organisation.....	73
Figure III.2. Système décisionnel hiérarchisé et composé de centres de décision.....	73
Figure III.3. Organisation décisionnelle supervisée et distribuée.....	74
Figure III.4. Réseau de centres de décision.....	74
Figure III.5. Représentation d'un centre de décision.....	75
Figure III.6. Représentation d'activités de décision collaborative	79
Figure III.7. Système distribué en e-maintenance.....	80
Figure III.8. Représentation de décision monoacteur	81
Figure III.9. Représentation de la décision externalisée	81
Figure III.10. Représentation d'une décision multiacteur	82
Figure III.11. Processus de décision collaborative adapté de Laborie.....	82
Figure III.12. Principe de réorganisation et de formation d'un Centre de Décision Collaboratif	84
Figure III.13. Typologie des regroupements R_i de CD	88
Tableau III.1. Intérêts des regroupements R_i de CD	89
Figure III.14. Deux types d'origine de la collaboration (amont et aval).....	90
Tableau III.2. Synthèse des caractéristiques décisionnelles du CDC en fonction des CD initiaux..	90
Tableau III.3. Détail du cadre de mission du CDC	91
Figure III.15. Application du modèle de Harzallah dans notre contexte d'étude.....	99
Figure III.16. Diagramme de classes des compétences de maintenance	99
Tableau III.4. Niveaux de décomposition des connaissances	100
Tableau III.5. Niveaux de décomposition des compétences.....	101
Figure IV.1. Répartition des ressources de e-maintenance	105
Figure IV.2. Caractéristiques de la performance	107
Figure IV.3. Extension de la TPM au e-service	108
Figure IV.4. Problématique de répartition des connaissances.....	108
Tableau IV.1. Différents cas de répartition des connaissances entre local et externalisé.....	108
Figure IV.5. Exemple d'affectation des connaissances des acteurs.....	112
Tableau IV.2. Exemple de répartition des connaissances entre les acteurs de maintenance.....	112
Tableau IV.3. Récapitulatif de la répartition des connaissances de maintenance.....	113
Figure IV.6. Évolution du taux de connaissances effectives	115
Figure IV.7. Évolution du taux d'utilisation des connaissances locales et externalisées	116
Figure IV.8. Traitement d'une sollicitation par les trois catégories d'acteurs	118
Figure IV.9. Schéma de principe du fonctionnement d'un acteur	118
Figure IV.10. Diagramme d'activités UML d'une catégorie d'acteur	120
Figure IV.11. Modélisation RdP de la génération des sollicitations	123
Figure IV.12. Modélisation RdP des répartitions de traitement.....	124
Figure IV.13. Modélisation RdP de la disponibilité des TIC et de l'acteur A_{i+1}	125
Figure IV.14. Modèle RdP des activités de e-maintenance	125

Figure IV.15. Exemple de marquages obtenus avec StpnPlay, pour le modèle RdP	126
Figure IV.16. RdP développé pour l'étude de sensibilité	128
Figure IV.17. Évolution du temps moyen de traitement en fonction du nombre de simulations	128
Figure IV.18. Évolution du temps moyen de traitement en fonction de λ_{TIC}	129
Figure IV.19. Temps moyen de traitement en fonction de λ_{TIC} et de α_{Ai+1}	130
Figure IV.20. Évolution du temps moyen de traitement des cas B en fonction de λ_{TIC}	131
Figure IV.21. Évolution du temps moyen de traitement des cas C en fonction de α_{Ai+1}	131
Figure IV.22. Évolution du temps moyen de traitement des cas C en fonction de λ_{TIC}	132
Figure IV.23. Évolution du premier RdP avec une nouvelle gestion des sollicitations	133
Figure IV.24. Évolution du temps moyen de traitement pour différents taux de réparation.....	134
Figure IV.25. Évolution du temps d'attente des traitements des sollicitations (P2)	134
Figure IV.26. Évolution du temps moyen de traitement des interventions en fonction de λ_{TIC}	135
Figure IV.27. Évolution du taux d'interventions traitées	139
Figure IV.28. Histogramme des traitements avec 80% de connaissances externalisées ($a=0,8$). 140	
Figure IV.29. Évolution de la durée moyenne d'intervention pour les deux situations $D_L \neq D_E$	141
Figure IV.30. Évolution du coût moyen d'intervention pour les deux situations $D_L \neq D_E$	142
Figure IV.31. Histogramme des traitements avec $a=0,8$ et indisponibilité des acteurs	143
Figure IV.32. Évolution du taux d'interventions traitées avec indisponibilité des acteurs.....	143
Figure A.1. Deux types de communication entre agents	A-3
Figure A.2. Principe Aalaadin reliant agent, groupe et rôle	A-5
Figure A.3. Présentation des agents du SMA développé dans l'environnement MadKit.....	A-7
Figure A.4. Diagramme de séquence obtenu à partir de MadKit.....	A-9
Figure A.5. Distribution des 100 simulations d'intervention via notre SMA	A-10

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONTEXTE INDUSTRIEL

Depuis quelques années, les évolutions technologiques ont intégré le monde industriel avec l'avènement des TIC (Technologies d'Information et de Communication). Les TIC ont fait évoluer les modes de travail des entreprises vers de nouvelles notions de e-service, de travail collaboratif, d'organisation distribuée et de mutualisation des connaissances. Les TIC sont des technologies qui permettent d'accéder, de produire, de diffuser et d'échanger des informations, avec des outils comme les ordinateurs, PDA (Personal Digital Assistant), Internet, intranet, ... Leur emploi dans le monde industriel vise à améliorer la performance des systèmes en contribuant à la communication et à l'accès aux informations. Toutefois, les TIC peuvent aussi entraîner des bouleversements dans l'organisation décisionnelle, dans la répartition des compétences des acteurs et de leur pouvoir décisionnel, ..., engendrant même des effets négatifs.

Les contraintes économiques forcent les entreprises à être de plus en plus performantes dans un environnement fortement concurrentiel dicté par les lois de marché. L'activité industrielle d'une entreprise étant conditionnée par ses décisions, celles-ci prennent une place de plus en plus grande au sein de l'organisation. Les décisions sont présentes à tous les niveaux de l'entreprise, du directeur à l'opérateur de production et peuvent s'avérer d'une grande diversité, devant être prises rapidement, souvent dans l'urgence, avec de nombreux paramètres et phénomènes complexes.

Dans ce contexte, le travail de thèse porte sur les processus décisionnels collaboratifs des systèmes distribués et l'intégration des TIC à ces processus, avec l'objectif d'en améliorer les performances.

Nous avons retenu pour cadre d'application la fonction maintenance, activité clé des entreprises qui contribue de manière essentielle à leur performance. Depuis plusieurs décennies, la fonction maintenance a subi de fortes évolutions pour répondre aux besoins économiques et techniques, consolidant ainsi son rôle dans le fonctionnement des entreprises. La fonction maintenance est également soumise aux exigences de l'environnement de l'entreprise, fortement contraint par ses clients, ses fournisseurs et ses concurrents. De par son action directe sur les équipements de production, la maintenance est devenue un levier de performance incontournable qui conditionne les performances d'une organisation. Même si les coûts des actions de maintenance ne sont pas négligeables, ceux liés aux arrêts de production ont un impact encore plus fort sur la production, les produits ou services proposés par l'entreprise et donc sur les clients.

La fonction maintenance est largement pénétrée par les TIC avec, par exemple, les concepts de télémaintenance ou de e-maintenance. L'introduction des TIC en maintenance a fait évoluer les modes de travail des mainteneurs vers une plus grande collaboration qui a bouleversé les échanges, les conditions de travail, les prises de décision, ... Une autre évolution concerne le travail à distance rendu possible par les TIC et le e-service et qui impacte sur les synchronisations des échanges, les relations

hiérarchiques,... Les activités décisionnelles en maintenance subissent ainsi l'intégration des TIC, phénomène important qui peut affecter les travaux même de maintenance et conditionner les performances de cette fonction. L'intégration et l'utilisation des TIC ne sont pas toujours préparées et peuvent induire plus de pénalités que d'améliorations, jusqu'à altérer même la performance des activités de maintenance.

Les activités de maintenance sont diversifiées ; elles concernent aussi bien des actions techniques impliquant des ressources sophistiquées avec du matériel avancé que des prises de décision complexes, nécessitant des ressources intellectuelles et immatérielles. Citons, par exemple, les activités de diagnostic qui nécessitent, pour les acteurs, de prendre les décisions adéquates pour l'identification de la défaillance et ainsi permettre la réparation de l'équipement défectueux.

Cette diversité rend la fonction maintenance d'autant plus intéressante à étudier ; nos travaux se concentrent sur une analyse des activités de décision collaborative en e-maintenance. Nous allons nous intéresser aux enjeux décisionnels et, plus particulièrement, aux ressources dont les décisions ont besoin, leur disponibilité et leur accessibilité permettant aux décideurs d'agir et de contribuer à la réalisation des activités de maintenance.

Nous adopterons souvent le point de vue du responsable de maintenance, depuis lequel peuvent être considérées les contraintes de l'entreprise, de son environnement avec les clients, fournisseurs et concurrents mais également les contraintes économiques et technologiques des TIC. Nous étudierons à ce niveau les performances et l'organisation du service de maintenance et ses évolutions afin de guider l'intégration et l'usage des TIC au sein de cette fonction.

PROPOSITION

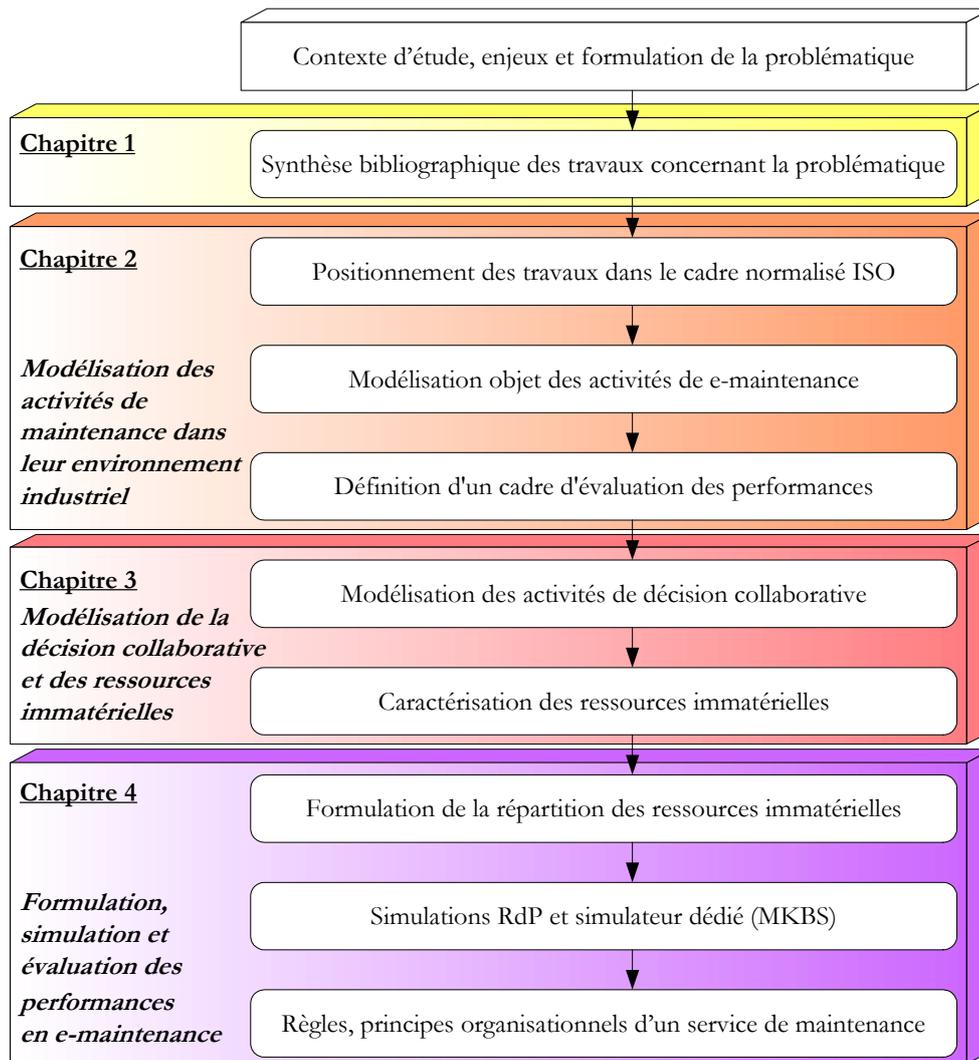
Nos travaux de thèse portent sur l'intégration des TIC (Technologies d'Information et de Communication) dans les processus décisionnels collaboratifs des systèmes distribués avec l'objectif d'en améliorer les performances, dans le cadre applicatif de la maintenance.

Nos objectifs sont, d'une part, d'analyser et de formaliser les processus décisionnels collaboratifs et l'influence des TIC sur ceux-ci et, d'autre part, d'offrir les moyens d'évaluation de performance d'un service de maintenance supporté par les TIC et contraint par la rentabilité économique.

Nos travaux se situent au croisement de plusieurs domaines : les systèmes décisionnels, les mécanismes collaboratifs, la fonction maintenance, les TIC et la gestion opérationnelle des compétences. La modélisation du problème revêt un caractère multidomaine, multivue et multiacteur et l'évaluation des performances est multicritère.

DÉMARCHE ET ORGANISATION DES TRAVAUX

Pour répondre à cette problématique, nos travaux sont organisés en quatre chapitres et peuvent être synthétisés selon l'organisation suivante.



Dans le premier chapitre, nous présentons un état des travaux existants qui se rapportent à notre problématique dans les domaines de la maintenance, des TIC et de la décision collaborative, utiles à nos développements. Nous donnons d'abord les bases et les principales notions de ces trois domaines. Nous analysons ensuite les préoccupations actuelles des travaux scientifiques dans chaque domaine.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons une modélisation des activités de maintenance dans leur environnement industriel.

Nous positionnons nos travaux dans le cadre normalisé de l'ISO 9001, avec une modélisation des processus présents dans les activités de e-maintenance.

Dans ce cadre normatif, nous suivons une approche de modélisation objet. Nous utilisons le langage de modélisation UML (Unified Modeling Language) pour détailler les composants intervenant dans notre étude afin de mettre en évidence les éléments clés de la performance de la e-maintenance, leurs échanges et les relations existant entre eux. Notre modélisation associe deux points de vue : statique et dynamique.

À partir des processus identifiés, nous définissons plusieurs familles de performance. Pour chacune de ces familles, nous nous appuyons sur la modélisation UML pour associer des indicateurs de performance pertinents.

Nous étudions dans le troisième chapitre les activités de décision collaborative.

Nous complétons l'état de l'art initial concernant la décision collaborative, son organisation et ses supports physiques que constituent les centres de décision. Nous présentons également la méthode GRAI (Graphe à Résultats et Activités Inter reliés) qui nous sert de point de départ pour la modélisation de la décision collaborative. Faisant suite aux modélisations du chapitre précédent, nous identifions des situations types de décision couramment rencontrées en e-maintenance.

Ensuite, nous étudions l'influence de la collaboration sur l'organisation décisionnelle. Exploitant le formalisme GRAI, nous analysons la collaboration entre centres de décision (CD) et leur regroupement qui induit la création d'un centre de décision collaboratif (CDC).

Nous mettons en évidence dans notre analyse l'importance des ressources immatérielles nécessaires à l'élaboration d'une décision. Nous apportons d'autres compléments bibliographiques dans ce domaine et analysons les travaux menés sur les connaissances et les compétences. Nous proposons une démarche de caractérisation des ressources immatérielles mises en œuvre en maintenance, associant aspects qualitatif et quantitatif, dans laquelle nous distinguons connaissances et compétences.

Dans le quatrième chapitre, nous proposons un cadre d'évaluation des performances des activités de e-maintenance en nous appuyant sur la caractérisation des ressources immatérielles du chapitre précédent.

Après avoir établi une relation corrélant la performance des activités de e-maintenance et la disponibilité des ressources immatérielles requises pour ces activités, nous proposons une formulation des ressources immatérielles en nous concentrant sur les connaissances. Cette formulation dépend de plusieurs paramètres dont, notamment, la complexité de l'intervention, la disponibilité des acteurs et la répartition des ressources entre le mode local et le mode externalisé via le e-service.

Nous obtenons ainsi un dimensionnement global des ressources immatérielles du service de maintenance, avec une répartition des connaissances et des compétences entre les modes local et externalisé.

Une première simulation par réseaux de Petri permet une formalisation du fonctionnement étudié.

À partir de la formulation théorique de la performance, nous spécifions les conditions de simulation. Nous proposons ensuite un simulateur dédié, MKBS (Maintenance Knowledge-Based Simulation) que nous avons développé.

Les résultats de simulation permettent d'établir les principes d'organisation d'un service de maintenance, notamment au niveau des règles de gestion des ressources immatérielles (bonnes pratiques de l'implantation et de l'utilisation des TIC), afin de garantir un niveau de performance du service (nous présentons également en annexe l'engagement d'une plateforme multiagents que nous avons utilisée à ce même effet).

Enfin, nous terminons le mémoire en concluant sur ces travaux. Nous rappelons, d'abord, les principaux résultats établis dans ce travail.

Nous présentons ensuite les pistes de recherche à suivre pour approfondir et prolonger ces résultats.



CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

Nous présentons dans ce premier chapitre une synthèse bibliographique des principaux domaines au croisement desquels est positionnée notre problématique. Ces domaines concernent le cadre applicatif de la fonction maintenance, les TIC et leur intégration dans un environnement industriel et les mécanismes liés à la prise de décision avec la dimension multiacteur du travail collaboratif.

Notre objectif est de situer les principaux enjeux de notre recherche en partant des manques constatés dans les travaux existants, pour ensuite proposer les pistes développées dans nos propres travaux.

Dans le premier paragraphe, nous allons rappeler les principaux concepts de la fonction maintenance, avec ses enjeux et ses différentes stratégies de mise en application. Tout d'abord, nous précisons les évolutions que la maintenance a subies récemment, tant sur le plan technologique qu'organisationnel. Nous abordons ensuite l'actualité des travaux de recherche avec les problèmes d'optimisation et de disponibilité des ressources de maintenance, d'ordonnement et de compatibilité avec la production, d'amélioration des techniques préventives ainsi que les développements de plateformes de e-maintenance intégrant ces diverses évolutions, en mettant en évidence les enjeux de modélisation qui nous intéressent.

Dans le deuxième paragraphe, nous nous intéressons aux Technologies d'Information et de Communication (TIC). Nous commençons par définir la notion de TIC avec ses évolutions récentes. Nous présentons un inventaire des outils associés. Nous terminons ce paragraphe sur les TIC en évoquant leurs principaux effets lors de leur intégration et utilisation dans une organisation et leur application potentielle en maintenance.

Le troisième paragraphe concerne la décision collaborative, déclinée en trois volets : la décision, le travail collaboratif et la décision collaborative. Nous commençons par la décision et ses principaux concepts : définitions et processus complétés par les courants de recherche sur cette thématique. Nous continuons avec le travail collaboratif, ses différentes formes, définitions et processus associés, ses modes et outils collaboratifs ainsi que les développements s'intéressant aux enjeux du travail en groupe. Nous abordons le mécanisme combiné de décision collaborative, les concepts de base déjà formalisés, les courants de recherche étudiant la décision collaborative dans des approches comparables à la nôtre et considérant également le contexte applicatif de la maintenance. Nous concluons sur la décision collaborative en proposant une définition de ce mécanisme et des processus associés.

I.1 LA FONCTION MAINTENANCE

Dans ce paragraphe, nous présentons la maintenance qui constitue le domaine applicatif de nos travaux. Nous abordons les évolutions de cette fonction clé des entreprises suite aux évolutions technologiques qui sont à l'origine de nos travaux.

I.1.1 Concepts et définitions

I.1.1.1 Définitions de la fonction maintenance

I.1.1.1.1 La fonction maintenance

D'après le dictionnaire [Robert 04], la maintenance regroupe "l'ensemble de tout ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement".

Face à cette première définition, la norme AFNOR NF EN 13306 [Afnor 01] offre une vision plus précise de la maintenance en indiquant que la maintenance intègre l'ensemble des activités techniques, administratives ou de management qui ont pour but de "maintenir ou de rétablir un équipement dans un état ou des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise".

Une activité de maintenance est souvent liée à une défaillance d'un bien.

Un bien est défini dans la norme AFNOR NF EN 13306 comme "tout élément, composant, mécanisme, sous-système, unité fonctionnelle, équipement ou système qui peut être considéré individuellement" ; une défaillance y est définie comme "l'altération ou la cessation de la capacité d'un bien à accomplir une fonction requise".

1.1.1.2 Maintenabilité et critères de maintenabilité

La maintenabilité est un des attributs de la sûreté de fonctionnement, comme la fiabilité, la disponibilité et la sécurité [Laprie 95]. Nous nous intéressons plus particulièrement aux notions de maintenabilité et de disponibilité, les autres grandeurs restant néanmoins importantes sans être au centre de nos intérêts. D'après la norme AFNOR X 60-500 [Afnor 88], la maintenabilité d'un système traduit son aptitude à "être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il puisse accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions d'utilisation données avec des moyens et procédures prescrits". La norme AFNOR NF EN 13306 [Afnor 01] associe le terme de disponibilité à l'aptitude d'un système "à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation données pendant une période donnée". Plusieurs critères comme le MTBF (Mean Time Between Failure), MTTR (Mean Time To Repair),... permettent de caractériser en termes de sûreté de fonctionnement le fonctionnement des biens maintenus.

En liaison avec cette définition de la maintenabilité, des travaux ont abordé la notion de critères de maintenabilité [Kaffel 03] qu'on retrouve dans la norme AFNOR X 60-301 [Afnor 82]. Ces critères sont au nombre de cinq :

- la surveillance en maintenance préventive et l'accessibilité des composants,
- les différents temps de la maintenance corrective, en matière de recherche de panne, de défaillance ou encore de diagnostic,
- l'organisation de la maintenance, avec la périodicité des interventions préventives, la présence d'indicateurs, la complexité des interventions,...
- la qualité des ressources immatérielles aidant à l'intervention,
- le suivi de l'équipement par le fabricant.

Parmi ces critères importants, nous nous intéresserons principalement dans notre travail au quatrième dédié à la qualité des ressources immatérielles impliquées dans la réalisation de l'intervention.

1.1.1.3 Niveaux de maintenance

La norme AFNOR X 60-000 [Afnor 02] propose un classement des actions de maintenance en cinq niveaux de complexité (Tableau I.1).

<i>Niveaux</i>	<i>Détails par niveau des actions selon la norme AFNOR</i>	<i>Définitions simplifiées</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)	Action s'effectuant sur le matériel
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	
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	Action s'effectuant en dehors du matériel
4^e niveau	Intervention de type spécialisé Réglage d'instruments de mesure Vérification d'étalons Travaux importants de maintenance corrective ou préventive	
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	Intervention de grande maintenance

Tableau I.1. Classification des actions de maintenance [Afnor 02]

Dans nos travaux, nous nous intéressons aux besoins des interventions en ressources et, plus particulièrement, en ressources immatérielles. Il nous a donc paru intéressant d'associer des ressources à chaque niveau de maintenance et de compléter cette décomposition par niveau de complexité des actions de maintenance, comme le proposent Monchy [Monchy 03] et Mechin [Mechin 07]. Une synthèse de l'affectation de ces ressources est présentée dans le Tableau I.2.

<i>Niveaux</i>	<i>Personnels d'intervention</i>	<i>Moyens</i>	<i>Documents</i>
1^{er} niveau	Exploitant sur place (opérateur, régleur,...)	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation Consommables	Procédures d'auto-maintenance Procédures d'assurance qualité
2^e niveau	Technicien ou exploitant habilité sur place (régleur, chef de ligne,...)	Outillage léger Pièces de rechange à proximité, sans délai	Procédures détaillées Instruction de maintenance
3^e niveau	Technicien de maintenance qualifié, sur place ou en local de maintenance	Outillage prévu Appareils de mesure, d'essai et de contrôle	Procédures détaillées Dossier machine
4^e niveau	Équipe de techniciens spécialisés, en atelier central Société spécialisée	Outillage spécialisé Matériel d'essai, de contrôle Pièces de rechange et sous-ensembles	Dossier machine Documents spécifiques Documents de préparation
5^e niveau	Constructeur du matériel Société spécialisée	Moyens logistiques proches de la fabrication par le constructeur	Documentation constructeur (spécifique)

Tableau I.2. Ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance

Cette affectation des ressources en fonction des niveaux ayant des seuils variables ne permet qu'une spécification globale mais elle met néanmoins en évidence les besoins en ressources humaines et matérielles, en pièces de rechange et en documents correspondant à chaque niveau de maintenance.

Nous constatons également un besoin en ressources de plus en plus spécialisées avec l'augmentation du niveau de maintenance.

I.1.1.2 Interaction de la maintenance et de la production

Au sein d'une entreprise, plusieurs fonctions coexistent dans l'objectif de produire des biens ou des services. La fonction maintenance intervient en support du processus de production de l'entreprise, en maintenant les moyens de production et les infrastructures [Maillet 05].

La maintenance a une position transversale dans l'entreprise puisqu'elle ne contribue pas directement à la production mais est un processus support. Cette position transversale la conduit à avoir une relation étroite avec la production avec laquelle des conflits peuvent survenir lors de l'organisation des activités de maintenance par rapport à celles de production.

I.1.2 Stratégies et méthodes de maintenance

Nous considérons maintenant les méthodes et stratégies classiques de maintenance, les modes d'optimisation de ces stratégies et ceux de contractualisation de la maintenance.

I.1.2.1 Stratégies classiques de maintenance

Une stratégie de maintenance traduit la manière dont la défaillance est considérée. Le traitement de la défaillance peut être fait de deux manières : intervention avant la défaillance, il s'agit alors de maintenance préventive ou après la défaillance et il s'agit de maintenance corrective. Ces deux formes de maintenance (préventive et corrective) correspondent aux deux mots-clés (maintenir et rétablir) de la définition AFNOR NF EN 13306 (cf. paragraphe I.1.1.1) que l'on peut décomposer et représenter comme sur la Figure I.1 [Monchy 03].

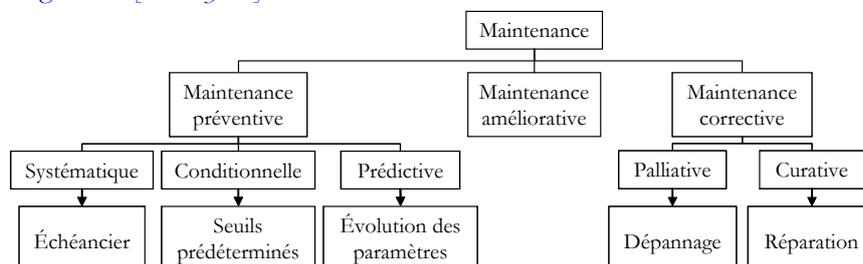


Figure I.1. Différentes stratégies de maintenance

La maintenance corrective est la forme de maintenance la plus "traditionnelle" car elle n'intervient qu'après l'apparition de la défaillance [Afnor 01]. Cette maintenance peut se traduire par deux types d'intervention. Le premier type est provisoire, avec des interventions palliatives (simples dépannages). Le second type a un caractère définitif, avec des interventions curatives (réparations ayant pour but de supprimer durablement les défaillances).

La maintenance corrective est dépendante du caractère aléatoire des défaillances ; elle n'est donc pas programmable et nécessite la disponibilité des ressources humaines et matérielles adéquates.

La maintenance préventive constitue une évolution des services de maintenance traditionnelle. Elle a pour but de diminuer les pertes dues aux défaillances, en les prévenant avant qu'elles ne surviennent [Afnor 01]. Il existe plusieurs types de maintenance préventive :

- la maintenance préventive systématique, organisée selon un échéancier, planifiée dans le temps ; elle est simple à mettre en place mais peut être coûteuse car les interventions ne sont pas toujours justifiées,

- la maintenance préventive conditionnelle, réagissant au franchissement d'un seuil détecté par un capteur, provoquant une intervention ; elle peut s'appliquer à tout système équipé d'un capteur détectant une anomalie ou une dérive,
- la maintenance prédictive (ou prévisionnelle), basée sur le suivi du matériel et sur des analyses périodiques, pour déterminer la tendance de la dégradation et estimer la période d'intervention ; elle permet de maximiser l'intervalle entre deux réparations.

La maintenance améliorative vise à augmenter la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité d'un équipement ou d'un sous-ensemble. Ce type de maintenance fait partie des interventions de grande maintenance, avec les travaux de rénovation et de remise à neuf [Afnor 01].

Les évolutions provoquées par les TIC sont rencontrées aussi bien en maintenance préventive qu'en maintenance corrective. En préventif, les TIC permettent, par exemple, de faire des relevés d'information à distance, notamment pour le prédictif. Les TIC aident aussi au démontage en rendant accessible la documentation de l'équipement à distance. En correctif, les TIC peuvent également aider à l'établissement de diagnostic.

I.1.2.2 Diversité des activités composant les interventions de maintenance

Les interventions de maintenance font appel à des activités de diverses natures qui, combinées, conduisent à la remise en fonctionnement de l'équipement [Péres 06]. La succession d'étapes qui composent une intervention peuvent être : la détection, le diagnostic, la réparation et le redémarrage de l'équipement. Entre ces étapes, des temps d'attente de disponibilité de ressources, de pièces de rechange,... peuvent s'intercaler.

La détection marque le début de l'intervention, déclenchée par l'occurrence d'un événement : défaillance en cas d'intervention corrective ou donnée calendaire en cas d'intervention préventive ; l'alerte est ensuite donnée en cas de maintenance corrective. L'étape de diagnostic consiste, à partir des constats effectués sur l'équipement, à formuler l'origine de la défaillance et à proposer la réparation qui semble la plus adaptée. La réparation va correspondre au changement du composant défectueux, à un réglage,... et se poursuit par des tests de conformité de l'intervention et la remise en fonctionnement de l'équipement.

Dans nos travaux, nous avons une approche générique des activités de maintenance, valable quelle que soit l'étape ou la stratégie de maintenance considérée.

I.1.2.3 Méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance

Les stratégies de maintenance permettent de spécifier globalement l'objectif des interventions de maintenance. L'optimisation de ces stratégies permet de préciser et d'améliorer les procédures d'intervention et le traitement des défaillances des équipements maintenus. Ces méthodes permettent également d'améliorer l'instrumentation des nouvelles technologies issues des TIC.

Il existe plusieurs types de méthodes d'optimisation et nous n'allons présenter ici que les plus connues et utilisées dans les entreprises. Ces méthodes de maintenance peuvent être classées en trois principales catégories [Despujols 05].

Ce sont, tout d'abord, les méthodes centrées sur la fiabilité des équipements : MSG-3 (méthode issue de l'industrie aéronautique), RCM ou MBF (maintenance basée sur la fiabilité) [Richet 96], OMF (optimisation de la maintenance par la fiabilité),... L'objectif initial commun à ces méthodes est d'assurer la sécurité d'équipements pour lesquels une défaillance n'est pas permise durant leur fonctionnement.

Ensuite, nous pouvons citer les méthodes centrées sur les risques : les méthodes "Risk Based" ou "Risk Informed", OMF-Structures (application aux tuyauteries et éléments support des centrales nucléaires). Contrairement aux méthodes basées sur la fiabilité, ces méthodes s'appuient sur une analyse des zones à inspecter en priorité de par le risque de défaillance.

Enfin, les méthodes centrées sur l'organisation des activités de maintenance peuvent contribuer à l'optimisation des stratégies de maintenance. Citons, par exemple, les méthodes japonaises de Kaisen (TQM, 5S, JIT, SMED,...) ou d'amélioration continue qui, même sans être spécifiques à la maintenance, ont contribué à la méthode TPM (Total Productive Maintenance). La TPM a pour objectif de faire réaliser un maximum de tâches de maintenance par l'opérateur de production travaillant sur l'équipement concerné, en mettant en place une politique de motivation du personnel, d'amélioration du contexte de travail et d'engagement d'action de progrès [McKone 99]. Les fonctionnalités des TIC permettant de rendre disponibles des informations distantes peuvent être comparées à la TPM. Tout comme la TPM qui permet de renforcer le partenariat opérateur / mainteneur, les TIC permettent à l'opérateur de bénéficier des connaissances du mainteneur et au mainteneur de celles d'experts distants du lieu d'intervention.

I.1.2.4 Modes de gestion de la maintenance

La maintenance peut être pratiquée de différentes manières, selon différentes méthodes et peut suivre des modes de gestion différents. Kaffel [Kaffel 01] propose une distinction des modes de gestion des activités de la maintenance en trois catégories :

- faire en interne, avec un service de l'entreprise dédié aux interventions de maintenance selon les méthodes et stratégies souhaitées par l'entreprise,
- faire faire : sous-traiter les interventions de maintenance à une autre entreprise, généralement spécialisée dans la maintenance,
- faire ensemble : cotraiter les interventions de maintenance avec une autre entreprise dans le cadre d'accords de coopération, basée sur une complémentarité des ressources. Une partie des interventions de maintenance sera réalisée par des ressources internes appartenant à l'entreprise (par exemple : les interventions correctives ne pouvant pas être prévues et planifiées à l'avance) tout en externalisant d'autres interventions nécessitant des ressources détenues par le partenaire (par exemple : les interventions préventives).

L'externalisation totale ou partielle des activités de maintenance peut améliorer les conditions d'intervention, en réduisant les durées et coûts d'intervention liés à la détention en interne de ressources coûteuses, en augmentant la fiabilité des équipements,...

I.1.3 Enjeux actuels de la maintenance

I.1.3.1 Nouvelles formes de maintenance

La maintenance, de par son appartenance au monde de l'entreprise, a subi les évolutions technologiques, organisationnelles et informationnelles de ces dernières années. Ces évolutions sont liées et interdépendantes et elles ont profondément modifié les méthodes de travail des acteurs de maintenance.

I.1.3.1.1 Évolutions technologiques et matérielles

La télémaintenance est une forme évoluée de maintenance [Kolski 93], [Kaffel 01], également appelée "remote maintenance", pour maintenance à distance. La norme AFNOR NF EN 13306 définit la télémaintenance comme la "maintenance d'un bien exécutée sans accès physique du personnel au bien"

[Afnor 01]. La télémaintenance peut également être vue comme "un système permettant de rapatrier et de traiter toutes les informations techniques du processus de production" [Fermouse 03], [Tararykine 05]. Il s'agit en fait d'activités de maintenance réalisées via un moyen de télécommunication [St Voirin 02]. La télémaintenance a donc pour objectif de gérer des équipements à maintenir à distance. Cette gestion distante nécessite un moyen de communication à distance (réseau, intranet, Internet). Une instrumentation des équipements concernés par des capteurs permet une surveillance et une détection des défaillances. Les données émises par les capteurs sont traitées par un ensemble d'acteurs de maintenance. Le système de gestion de ces données est le plus souvent localisé en atelier de maintenance et permet le traitement à distance. Ce type d'instrumentation peut également être appelé télésurveillance ou télédiagnostic [St Voirin 02].

Les champs d'application de la télémaintenance sont diversifiés [St Voirin 02] comme, par exemple :

- en informatique : maintenance de matériel informatique à distance (photocopieur, ordinateur, imprimante,...) où détection et réparation de défaillances sont réalisées à distance, avec également la planification d'interventions préventives de remplacement de consommables ou de réglages divers [Ivanov 03],
- en médecine : télémaintenance de matériel, télédiagnostic, télésurveillance et même téléchirurgie de patients permettant de réduire les coûts de disponibilité de personnels qualifiés en plusieurs lieux ; les experts sont réunis en un même lieu et travaillent à distance [Hazebroncq 03],
- en aéronautique et militaire : télémaintenance d'avions ou d'engins militaires à distance afin de maintenir un fonctionnement minimal durant leurs missions [Pérès 04], [Bressy 05],
- en situation de danger, de risque pour l'humain : télémaintenance d'équipements nucléaires, de matériels pouvant engager la sécurité des agents de maintenance [Ivanov 03],
- dans l'industrie : télémaintenance des équipements de production.

La e-maintenance est également une forme évoluée de maintenance avec l'avènement d'Internet et des TIC, qui permet de partager des connaissances et de faire collaborer des acteurs [Jung 06], [Lee 06], [Muller 08]. La e-maintenance est associée à la notion de service intelligent puisqu'elle permet d'accéder à des connaissances externalisées, de e-service (service électronique via Internet, détaillé au paragraphe I.2.1).

Elle permet de rendre disponibles des ressources à distance ; ces ressources peuvent être matérielles (pièces de rechange, outillage,...) ou immatérielles (humaines ou informatiques) (Figure I.2). Les ressources externalisées sont accessibles grâce au réseau Internet, aux outils de communication, d'échange et d'accès à l'information que l'on peut regrouper sous le terme de e-service.

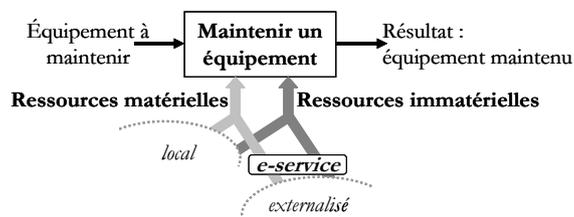


Figure I.2. Représentation de l'activité de e-maintenance

Les activités de maintenance engagent plusieurs entités dont principalement :

- les équipements : ressources matérielles à maintenir (objet de l'intervention),

- les appareillages et outillages : matériels techniques permettant aux acteurs de préparer et / ou de réaliser des interventions (montage, mesure, organisation),
- les acteurs de maintenance (mainteneur, expert, responsable,...) intervenant tant au niveau des ressources matérielles (par l'activation de ces ressources) qu'à celui des ressources immatérielles (par l'apport des connaissances et compétences qu'ils détiennent),
- les bases de données contenant également des ressources immatérielles (données, informations, connaissances) pouvant aider le mainteneur à réaliser l'intervention,
- les manuels et autres documents papier étant des ressources matérielles contenant des ressources immatérielles, du même type que les bases de données.

Les ressources matérielles et immatérielles sont influencées de diverses manières par le e-service. La e-surveillance ou le e-diagnostic concerne essentiellement les ressources matérielles ; l'accessibilité et la mise à disposition à distance de ressources humaines selon le besoin en connaissances et compétences se rapportent aux ressources immatérielles.

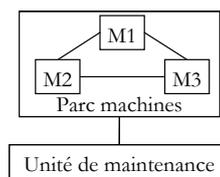
Nos travaux n'abordent pas la réalisation d'intervention de maintenance entièrement pilotée à distance. Ils sont axés sur les ressources immatérielles nécessaires à la réalisation des interventions de maintenance et leur accessibilité à distance, sur la base d'enjeux que nous détaillerons au paragraphe III.4.

Nos travaux s'accordent au concept d'intelligence ambiante puisque la maintenance a été une des premières cibles des applications industrielles de l'informatique ubiquitaire, issues de ce concept [Kopácsi 07]. Le concept d'intelligence ambiante est lié à l'idée d'un dispositif informatique omniprésent ou ubiquitaire (informatique confortable d'utilisation, inaperçue et transparente). Par exemple, un ordinateur ubiquitaire correspond à un dispositif d'ordinateurs, intégré à son environnement et pouvant se déplacer avec son utilisateur. Notre approche de la e-maintenance s'oriente vers ce dispositif informatique permettant d'accéder à des ressources immatérielles distantes et aidant ainsi la réalisation des interventions de maintenance.

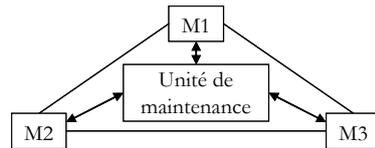
1.1.3.1.2 Évolutions organisationnelles et distribution de la maintenance

Parallèlement aux évolutions technologiques ayant conduit à la e-maintenance, l'organisation spatiale de la maintenance a également évolué. Nous considérons différentes organisations du système de maintenance et des ressources qui le composent [Banâtre 91] :

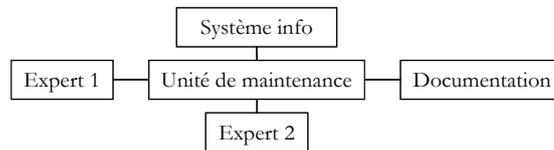
- le service de maintenance est distant du parc à maintenir : Figure I.3a,
- l'ensemble d'équipements maintenus est distribué [Kaffel 01] : Figure I.3b,
- le service est composé de ressources distribuées [Han 06] : Figure I.3c.



a. Système de maintenance distant du parc d'équipements



b. Système de maintenance d'un parc d'équipements distribués



c. Système de maintenance composé d'éléments distribués

Figure I.3. Trois déclinaisons de l'organisation spatiale d'un système de maintenance

Nous nous intéressons à une généralisation de ces situations avec un parc d'équipements à maintenir pouvant être distribués, un système de maintenance pouvant être distant et être, lui-même, composé d'éléments distribués dont un centre d'experts délocalisé.

1.1.3.1.3 Évolutions logicielles

Les évolutions technologiques ont également concerné les systèmes de gestion des activités de maintenance. La gestion de la maintenance peut être réalisée à l'aide d'outils logiciels qui ont eux-mêmes évolué au fur et à mesure des évolutions technologiques.

La gestion de la maintenance peut être appréhendée selon trois approches différentes, dépendantes du niveau d'analyse :

- opérationnel, avec la supervision, le contrôle et la commande de l'ensemble des capteurs et actionneurs constituant l'instrumentation des équipements à maintenir [Bayart 05],
- intermédiaire, avec la gestion du fonctionnement du système de maintenance (correspondant au niveau tactique d'un système décisionnel, détaillé au chapitre III) ; c'est à ce niveau qu'interviennent les outils de GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur),
- global, commun à l'ensemble de l'entreprise, avec l'intégration à des progiciels génériques de type ERP (Enterprise Resource Planning).

Nos développements doivent s'accorder à ces types d'outils logiciels, dans le cadre d'une future exploitation.

1.1.3.2 Gestion des ressources de maintenance

Certains auteurs se sont intéressés à la gestion des ressources de maintenance en proposant des éléments d'amélioration, notamment, pour l'allocation de ces ressources [Brown 99], [Fiori 06] et leur disponibilité [Elegbede 03] dans l'objectif d'optimiser leur potentiel d'utilisation. Il s'agit de planifier des ressources critiques, comme dans [Adzakpa 04], [Aghezaf 07] où les auteurs proposent des méthodes d'optimisation selon des modèles mathématiques avec des paramètres tels les coûts, les durées d'intervention et les taux de défaillance des équipements.

La maîtrise des coûts est toujours un des enjeux majeurs de la maintenance. L'évaluation de ces coûts n'est pas toujours aisée et nécessite d'identifier les centres de coûts et les différents coûts (directs, indirects, fixes ou proportionnels) liés au personnel, aux outillages, aux pièces de rechange mais aussi ceux de sous-traitance, d'arrêt de la production,... [Dumont 01], par l'intermédiaire de méthodes dédiées "Life Cycle Cost" (LCC).

D'autres travaux concernent la réduction des critères de coûts [Bris 03] via celle des durées des interventions de maintenance [Benmounab 05] afin de minimiser les ressources engagées.

Les pièces de rechange sont également un point important des ressources de maintenance puisque, sans elles, les interventions ne peuvent être réalisées alors que le coût de possession de ces pièces tient une place importante. Plusieurs difficultés les concernent : leur disponibilité et leur commande (quantité, délai,...) ainsi que leur stockage (état du stock, lieu d'inventaire,...). Il est important de prévoir de manière rigoureuse leur utilisation, en étudiant les équipements, leur probabilité de défaillance, la planification des interventions préventives,... [Kaffel 03].

Les travaux cités dans ce paragraphe s'intéressent aux ressources nécessaires au bon déroulement des activités de maintenance. Cependant, les ressources immatérielles, également indispensables aux interventions de maintenance, ne sont pas évoquées dans les travaux présentés ni, à notre connaissance, ailleurs. Nous allons donc focaliser notre approche sur cette catégorie de ressources de maintenance qui sont fortement influencées via leur accessibilité par les TIC.

I.1.3.3 Organisation, compatibilité de la maintenance avec la production

Les interventions de maintenance réalisées sur les équipements de production nécessitent souvent un arrêt de la production. La cohabitation production - maintenance n'est pas toujours facile car la production accepte difficilement d'arrêter ses équipements pour réaliser la maintenance nécessaire pour que les équipements continuent de fonctionner. Des problèmes d'ordonnancement et de planification entre la maintenance et la production sont abordés par certains auteurs, comme [Coudert 99], [Iranon 03].

Même si nous n'abordons pas cet aspect dans nos travaux, il est important de garder en mémoire que les activités de production n'intègrent pas toujours très facilement les contraintes de maintenance.

I.1.3.4 Amélioration des techniques préventives

La maintenance préventive est basée sur des méthodes élaborées de prévision des interventions mais utilise également des techniques avancées d'aide à la surveillance, d'aide à la détection de dérives des équipements,... Les systèmes embarqués posent des difficultés quant à la surveillance des équipements et la détection des défaillances [Le Parc 04]. Des architectures proposent des éléments de réponse dans le cadre d'une maintenance proactive (prévision du comportement des équipements) [Ghelam 05].

Les techniques d'aide au diagnostic peuvent s'appuyer sur des architectures distribuées et issues de l'intelligence artificielle, comme le permettent les systèmes experts ou les systèmes multiagents [Marzi 02].

Nous ne nous attardons pas non plus sur cet aspect de la maintenance, nous nous appuyons seulement sur les résultats de ces travaux concernant la maintenance des systèmes embarqués et leur isolement potentiel en cas de défaillance des TIC.

I.1.3.5 Instrumentation de la maintenance : quelques applications

Des travaux de recherche, souvent dans le cadre de partenariats industriels, se sont orientés vers la conception et la réalisation de plateformes d'instrumentation de solutions de e-maintenance. Ces plateformes intègrent les différents éléments précédemment évoqués, comme les capteurs actionneurs instrumentant les équipements à maintenir, les systèmes distribués de surveillance, les supports de communication. Il existe plusieurs plateformes comme, par exemple :

- celle du projet européen Proteus [Bangemann 06] : plateforme générique pour la e-maintenance, développée à l'aide des technologies d'Internet et permettant notamment la collaboration des

- acteurs, le couplage avec les outils classiques de gestion d'entreprise de type ERP (Enterprise Resource Planning), l'aide au diagnostic, l'accessibilité à diverses ressources (bases de données),...
- celle du projet TEMIC (TELé-Maintenance Industrielle Coopérative) [Garcia 04] : plateforme de e-maintenance privilégiant la collaboration d'acteurs de maintenance via un réseau de téléphones portables,
 - NEMOSYS (naval E-Maintenance Oriented SYStem), développé à la DCN (Direction des Constructions Navales) [Bresy 05] : plateforme assurant la maintenance de systèmes embarqués,
 - le système de maintenance intelligent, développé par le centre américain IMS (Intelligent Maintenance System) [Lee 06] : outil privilégiant la prévention des défaillances afin d'éviter leur occurrence, en se basant sur des techniques prédictives avancées,
 - TELMA (TELé-Maintenance) développé par le CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) [Levrat 06] : plate-forme pour l'enseignement et la recherche supportant les enseignements de la maintenance et illustrant les apports des TIC sur les processus et organisations de maintenance.

D'autres projets européens traitant de la e-maintenance sont en cours. Citons, par exemple :

- DYNAMITE (Dynamic Decision in Maintenance), projet utilisant la plateforme TELMA centré sur les composants communicants permettant à des acteurs en local auprès des équipements à maintenir de communiquer et de collaborer avec des experts en atelier de maintenance [DYNAMITE 05],
- TATEM (Technologies And Techniques for nEw Maintenance concepts), projet visant à réduire les coûts de maintenance sur les avions face à l'augmentation de leur technicité [TATEM 04],
- SMMART (System for mobile maintenance accessible in real time), projet basé sur la combinaison de nouvelles technologies sans fil permettant de communiquer dans des environnements hostiles et de contrôler ainsi la maintenance et le cycle de vie de composants critiques [SMMART 05].

Ces projets et plateformes offrent des solutions d'instrumentation de technologies avancées pour la réalisation d'intervention de maintenance. Néanmoins, elles restent trop centrées sur les éléments matériels et technologiques qui les composent, sans aborder les ressources immatérielles qui nous intéressent.

Tous les travaux récents que nous venons de présenter pour introduire la fonction maintenance ont, le plus souvent, une approche "matérielle" de la maintenance même si les évolutions technologiques faisant suite aux TIC sont évoquées. Les ressources immatérielles et la problématique de leur engagement, de leur distribution et de leur disponibilité sont peu évoquées dans la littérature. Nos travaux vont donc se concentrer sur cet aspect de la e-maintenance, en proposant notamment des éléments de modélisation (cf. paragraphe III.4). Nous proposerons également au chapitre II une modélisation des activités de e-maintenance en analysant l'organisation des éléments les composant et le déroulement de scénarios de e-maintenance.

I.2 LES TECHNOLOGIES D'INFORMATION ET DE COMMUNICATION (TIC)

Dans ce paragraphe, nous abordons plus précisément les TIC (Technologies d'Information et de Communication) qui sont à la fois la conséquence des évolutions technologiques de ces dernières décennies et la cause de nombreux changements et bouleversements au sein des entreprises. Ce

paragraphe a pour objectif de présenter les outils technologiques associés aux TIC et d'inventorier les principaux effets des TIC décrits dans la littérature.

1.2.1 Définitions des TIC et du e-service

Les TIC regroupent les technologies d'information et de communication. Le dictionnaire en ligne de l'Office québécois de la langue française propose la définition suivante : "ensemble des technologies issues de la convergence de l'informatique et des techniques évoluées du multimédia et des télécommunications qui ont permis l'émergence de moyens de communication plus efficaces, en améliorant le traitement, la mise en mémoire, la diffusion et l'échange de l'information" [[Office québécois 08](#)]. Les TIC agissent donc principalement sur la communication, l'accès et le traitement d'informations.

Cette définition traduit bien la combinaison de deux types de technologies :

- celles de l'information qui permettent d'accéder, de stocker, de traiter et de convertir des informations, avec par exemple, un ordinateur, un PDA (Personal Digital Assistant), une tablette graphique,...
- celles de communication qui permettent de transmettre, d'échanger des informations, en prenant appui sur diverses formes de réseaux : Internet, intranet,...

Les TIC ont considérablement amélioré les possibilités d'échange et de stockage de données et leur disponibilité, en améliorant les temps de transfert et les capacités de traitement. Les TIC sont associées aux ordinateurs personnels, aux téléphones intelligents (ayant de nombreuses fonctionnalités : Internet, musique, grande capacité de stockage,...), aux ordinateurs de poche, aux baladeurs numériques,...

Elles suivent l'actualité des développements dans les domaines des télécommunications (notamment les réseaux) et du multimédia, avec une amélioration notable de la convivialité des produits et services qui en sont issus.

Les outils technologiques TIC ont pour principale fonction de prolonger les capacités humaines (voix, vue et même ouïe) en prenant le relais au-delà de leur limite.

Les TIC sont à l'origine de nouveaux termes, comme le "e-service" que nous avons déjà utilisé et qui est un service basé sur l'électronique. Le e-service est fondé sur l'utilisation des TIC, en associant consultation, acquisition, stockage, traitement et mesure d'informations, de documents et, ce, par l'intermédiaire d'Internet. Il existe une multitude de e-services disponibles à partir d'Internet comme, par exemple : consultation de comptes bancaires, achats en ligne, messagerie électronique ou instantanée, ... Nous considérons donc par la suite le e-service au sens large du terme, en englobant l'ensemble des possibilités d'application Internet [[Rey 02](#)].

1.2.2 Cartographie des outils issus des TIC

Les TIC peuvent être classées de plusieurs manières.

La première classification, la plus simple, consiste à différencier les technologies permettant de traiter de l'information de celles permettant de communiquer.

Nous pouvons compléter cette première classification en identifiant le degré d'utilisation des TIC et en les différenciant selon les usages. Une étude réalisée dans des PME [[Ladame 07](#)] a permis de dégager quatre usages distincts des TIC :

- usage incontournable, normal (mail, recherche d'info,...),
- usage courant (veille concurrentielle, téléchargement,...),
- usage plus élaboré (achats en ligne, travail à distance, travail collaboratif,...),
- usage marginal (e-learning, usage de plateformes de travail,...).

Cette deuxième classification renseigne davantage sur les possibilités d'utilisation des TIC au sein d'une entreprise sans développer les fonctionnalités offertes, ni les enjeux qui les concernent.

La troisième manière de cartographier les TIC est opérée selon les services qui leur sont attachés. [Bitouzet 97], [Germain 98], [Ermine 03] : communication, coordination, partage d'information et partage de ressources, permettant de former un espace organisé selon ces quatre axes et rassemblant les principales familles d'outils TIC (Figure I.4).

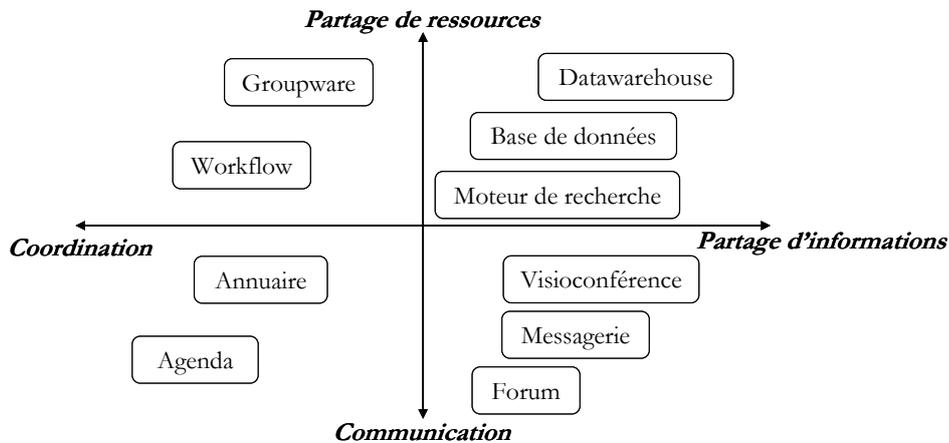


Figure I.4. Cartographie des TIC selon les services correspondants

1.2.3 Effets des TIC

L'intégration et l'utilisation des TIC au sein d'une organisation ont de nombreux effets, tant positifs que négatifs. Une étude bibliographique des courants de recherche étudiant les TIC nous a permis de dégager trois principaux impacts : technologique, économique et organisationnel. Pour chacun de ces types d'impact, nous détaillons les effets possibles, en indiquant s'il s'agit d'un effet bénéfique ou néfaste lorsque la référence le précise. Nous résumons cette étude bibliographique dans le [Tableau I.3](#).

Types d'impact	Détails	Natures de l'impact (+ / -)	Références
Technologique	Communication, échanges		[Chartron 94] [Pendbarkar 04]
	Information, système d'information, connaissances	-Risque de surinformation	[Isaac 07]
		+Meilleur accès à l'information et aux connaissances, meilleure gestion des connaissances	[Carlsson 04] [Charbit 02] [Gallié 02] [Hatami 03] [Rallet 04] [Zacklad 06]
	Mobilité, système distribué	-Réduction de la mobilité (complexification de l'existant, alourdissement des échanges,...)	[Roubier 03]
		+Amélioration de la mobilité, du travail à distance	[Al-Taitoon 04] [Bowden 06] [Cucchi 04] [Dustdar 03] [Reijf 01] [Smit 05]
	Économique, performance	Relation extérieure à l'entreprise (amélioration des relations)	
Évaluation, impact sur les performances		[Dudezert 06] [Gumasekaran 06] [Melchert 04]	
Productivité, coûts		-Dégradation de la productivité, des performances des employés	[Retijf 02]
		+Amélioration de la productivité des employés et réduction des coûts (de travail, de matériels,...)	[Bowden 06] [Gretton 04] [Parbam 04]
Organisationnel, structurel	Décision, aide à la décision	-Subjectivité, ambiguïté provoquées par les TIC	[Levy 04]
		+Aide des TIC pour prendre des décisions	[Bhargava 07] [Vlabos 04]
	Organisation, structure de l'entreprise	-Modification de l'organisation, des interactions	[Kling 87] [Mallet 06]
		+Apports, aides stratégiques	[Bubalis 04] [Zee 00]
	Social (travail en groupe, relation entre personnes,...)	+ autonomie, + de travail collaboratif	[Bengbozi 00]
		⇒ modification des relations, des liens hiérarchiques ⇒ travail s'orientant vers des sous-groupes au lieu d'organisation globale ⇒ besoin de plus de qualification des employés	[Besseyre 06] [Charbit 02] [Chartron 94] [Rallet 04]

Tableau I.3. Classification des effets des TIC au sein d'une organisation

Un des principaux constats concerne la disparité entre les travaux abordant les effets positifs que les TIC provoquent au sein d'une organisation et le faible nombre de travaux osant affirmer que les TIC peuvent avoir des effets négatifs.

Parmi les principaux effets négatifs des TIC, nous pouvons citer le risque d'avoir une trop grande profusion d'information à traiter (risque de ne pas réussir à dégager les informations pertinentes au milieu d'un bruit inutile) ou encore la perte de performance que les TIC peuvent provoquer en cas de mauvaise utilisation, les difficultés de prise en main des outils TIC,...

Malgré ce constat, certains travaux confirment notre approche des TIC avec leur prédisposition à désorganiser une structure [Mallet 06], à influencer sur la productivité et les performances des employés [Retijf 02] mais également à améliorer l'accès à des sources d'information ou de connaissance et à faciliter le travail à distance.

1.2.4 Utilisation et intégration des TIC en maintenance

L'intégration des TIC en maintenance doit permettre d'améliorer les performances du service, en augmentant notamment la disponibilité des équipements maintenus tout en minimisant les ressources utilisées. La principale caractéristique des TIC est de rendre disponible et accessible une ressource distante.

En maintenance, les ressources et, plus particulièrement, les ressources immatérielles, constituent un enjeu majeur dans la réalisation des interventions. Les TIC peuvent permettre d'accéder via à un réseau comme Internet depuis le site d'intervention à des ressources non présentes en local (délocalisées) mais qui peuvent s'avérer primordiales quant à la résolution de l'intervention [White 04].

Nous pouvons résumer l'intégration des TIC au sein d'une organisation de maintenance, par :

- un renforcement du cadre de mission de l'acteur local et de son cadre de décision (cf. définitions chapitre III) grâce à l'appui de ressources immatérielles externalisées,
- une amélioration de l'organisation du travail par une meilleure répartition des ressources.

Nous avons abordé au paragraphe I.1.3.1 les évolutions technologiques, matérielles, organisationnelles ou logicielles de la maintenance. L'influence des TIC en maintenance va donc être perçue au niveau opératoire (acquisition, stockage, exploitation d'informations,...) ou avoir une finalité plus complexe, permettant notamment de rendre des informations distantes disponibles et d'aider à une prise de décision [Reyterou 02].

En maintenance, les TIC peuvent intervenir quelle que soit l'étape considérée. Nous avons déjà vu que les TIC peuvent aider à la détection de défaillances, avec une instrumentation des équipements à maintenir en capteurs et actionneurs. En diagnostic, les TIC pourront aider à l'établissement de diagnostic, en mettant à disposition le traitement de défaillances similaires déjà rencontrées, un système expert d'aide au diagnostic,... Elles pourront aider à réduire la durée d'intervention en rendant disponibles certaines ressources de maintenance à distance.

Si on considère, par exemple, une intervention corrective, nous présentons dans le Tableau I.4, quelques exemples d'apports des TIC pour les étapes classiques de maintenance, extraits des travaux de [Pérès 06].

Détection, alerte	<i>e-détection</i>
	surveillance et tests, consultation éloignée des alarmes
Préparation, attente de diagnostic	<i>e-assistance</i>
	centre d'appel, hotline,...
Diagnostic	<i>e-diagnostic</i>
	e-documentation, système expert, réseaux neuronaux,...
Logistique, attente de réparation	<i>e-gestion</i>
	gestion des rechanges
Action (réparation, tests)	<i>e-contrôle</i>
	assistance de l'opérateur, téléopération
Redémarrage, contrôle	<i>e-information</i>
	e-documentation pour test et réglage

Tableau I.4. Apports du e-service à la maintenance corrective [Pérès 06]

Des travaux récents s'intéressent à la problématique des TIC en maintenance. Citons les travaux de Reyterou [Reyterou 02] où l'auteur propose une méthodologie d'intégration des TIC en maintenance

aéronautique ou ceux de Tararykine [Tararykine 05] où une modalisation des flux d'information au sein d'une plateforme de e-maintenance est proposée.

En maintenance, des travaux étudiant les TIC existent. Même s'ils abordent les TIC comme vecteur d'information et de communication, ils restent plutôt axés sur l'aspect technologique et matériel que les TIC facilitent, notamment avec les plateformes de e-maintenance. Le manque de travaux concernant la dimension "intelligence" des TIC qui rendent accessibles des ressources immatérielles distantes confirme l'intérêt notre piste de recherche.

I.3 LA DÉCISION COLLABORATIVE

En maintenance, les activités de décision ont une certaine importance, lors de l'établissement d'un diagnostic, du choix d'une stratégie, d'une procédure de réparation ou de démontage,... Pour prendre une décision, il est nécessaire d'avoir à disposition les informations adéquates. C'est dans l'accessibilité et la mise à disposition de ces informations que les TIC vont influencer les décisions de maintenance. De même, les rapprochements d'acteurs vont être causés par les TIC, leur permettant de travailler à plusieurs ou les aidant à mieux travailler en groupe.

Ce paragraphe a pour objectif de définir les notions de décision et de collaboration. Nous présentons également la décision collaborative, activité au centre de nos travaux.

I.3.1 La décision

I.3.1.1 Définitions de base de la décision

I.3.1.1.1 Définitions étymologiques et terminologiques

Nous partons de la définition du dictionnaire [Robert 04] qui définit l'action de décider, comme le fait de "porter un jugement, adopter une conclusion définitive sur un point de litige" ou "arrêter, déterminer ce qu'on doit faire". Le dictionnaire québécois de la langue française complète cette première définition en indiquant que la décision est une "action volontaire de faire le choix d'une solution face à un problème défini" [Office québécois 08].

La recherche scientifique a également proposé quelques définitions, regroupées dans le Tableau I.5.

Définitions	Références
Décider, c'est "identifier et résoudre les problèmes que rencontre toute organisation".	[Le Moigne 74]
La décision est synonyme de "choix entre plusieurs solutions existantes, ayant chacune des conséquences différentes, le choix sera fait selon des critères précis de sélection".	[Kast 93]
La décision correspond à "l'ensemble des actions que le décideur effectue pour prendre une décision et la mettre en œuvre".	[Barabel 96]
"Une décision est une sélection de l'éventualité dont on pense qu'elle permettra d'obtenir les avantages optimaux et les inconvénients minimaux".	[Berchet 00]
"Une décision est un processus qui conduit un acteur à répondre à une question posée".	[Stal 00]
"Décider, c'est choisir l'action à entreprendre, c'est-à-dire choisir une action parmi toutes celles qui sont possibles. Les actions sont aussi appelées des solutions ou des options".	[Bellut 02]
"La décision est un processus de transformation d'informations. Il conduit un acteur ou un groupe d'acteurs de l'organisation à répondre à une question donnant lieu à une action (par la réponse)".	[Longueville 03]

Tableau I.5. Définitions de la décision

Malgré les différences qui marquent les définitions du [Tableau I.5](#), nous avons noté les points communs suivants :

- une décision a pour objectif de résoudre un problème,
- elle doit se concrétiser par une action,
- elle peut être individuelle ou collective et, parfois, distribuée,
- elle peut être construite à partir de solutions existantes partielles parmi lesquelles le décideur choisit une solution pouvant répondre au problème posé.

Le choix à opérer lors d'une prise de décision n'est pas totalement arbitraire, il doit reposer sur une certaine rationalité. Pour cela, la définition et l'utilisation de critères de sélection sont nécessaires. Les critères permettant de faire un choix dépendent principalement de l'objectif de la décision. Si l'objectif est unique, la décision sera monocritère. Dans la plupart des cas, la décision sera associée à plusieurs objectifs et devra donc être multicritère [[Berchet 00](#)]. Contrairement à la situation monocritère qui peut être résolue assez facilement, la décision multicritère nécessite des méthodes de résolution plus élaborées.

L'analyse multicritère nécessite un travail préparatoire des critères, visant à les identifier, les formaliser explicitement, les classer selon une priorité et, même, les agréger afin de combiner les critères et ainsi rendre possible la prise de décision.

Les techniques multicritères peuvent être linéaires, itératives ou encore hiérarchiques. Chaque décision est un cas particulier qui nécessite l'utilisation d'une méthode adaptée correspondant, dans la plupart des cas, à une solution possible mais pas forcément optimale.

Bien que notre approche soit qualifiée de multicritère, les critères que nous étudions sont difficilement exprimables, ce qui rend les approches présentées inapplicables à nos travaux, sans une préparation préalable des données étudiées.

I.3.1.2 Processus décisionnel

Les définitions de la décision du paragraphe précédent ont montré qu'il s'agit d'une activité complexe, basée sur un enchaînement de mécanismes conduisant à une prise de décision. Il est possible de matérialiser cet enchaînement par un processus décisionnel composé de plusieurs étapes. La littérature propose plusieurs modélisations du processus décisionnel.

Simon et Le Moigne sont parmi les premiers à proposer une formalisation de la décision comme une succession d'étapes intermédiaires formant un processus. Initialement, le processus proposé par Simon était composé de trois étapes [[Simon 60](#)] :

- "intelligence" : recherche d'information, de renseignement sur le problème à résoudre, ses contraintes et son environnement,
- "design" : conception, développement et analyse des solutions possibles pouvant répondre au problème posé,
- "choice" : évaluation et choix de la solution, en appliquant des critères d'évaluation, puis mise en pratique de la décision choisie, des actions à mettre en place pour résoudre le problème initial.

Une quatrième étape a été ajoutée au modèle initial de Simon : "review" traduisant la remise en cause du processus ou d'une de ses étapes [[Simon 77](#)]. Cette quatrième étape peut être vue comme une étape d'évaluation du processus afin de valider la décision à appliquer. Le processus décisionnel de Simon est présenté sur la [Figure I.5](#).

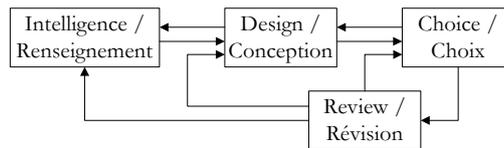


Figure I.5. Processus décisionnel de Simon [Simon 77]

Courbon [Courbon 82] a également proposé une modélisation du processus décisionnel, sous forme cyclique (Figure I.6), permettant un rebouclage et un réajustement au fur et à mesure de l'évolution du processus.

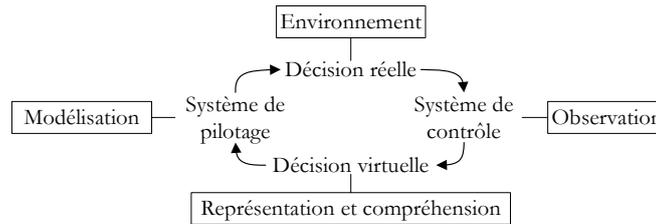


Figure I.6. Cycle de la décision de Courbon [Courbon 82]

Lavergne [Lavergne 83] propose une autre décomposition des étapes conduisant à une décision. Dans ses travaux, il identifie six étapes traduisant le processus décisionnel, représentées sur la Figure I.7.



Figure I.7. Processus décisionnel de Lavergne [Lavergne 83]

Stal-Le Cardinal [Stal 00] contribue également à la modélisation du processus de décision pour étudier les dysfonctionnements lors du choix des acteurs. Son modèle intitulé DTL (Decision Time Line) repose sur la perception de la décision comme un processus inscrit dans le temps, se déroulant en plusieurs étapes (Figure I.8).

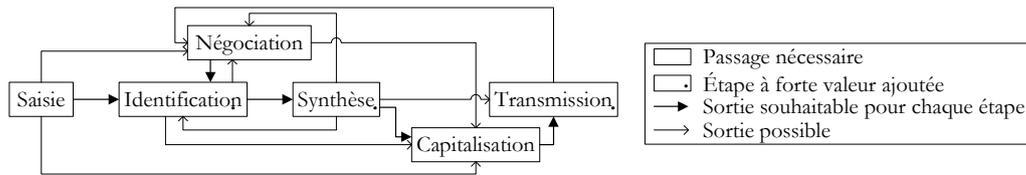


Figure I.8. Modèle DTL (Decision Time Line) [Stal 00]

Plus récemment, d'autres auteurs se sont intéressés à la modélisation de la prise de décision, en considérant la capitalisation des connaissances (Figure I.9) comme, par exemple, Cauvin [Cauvin 05].

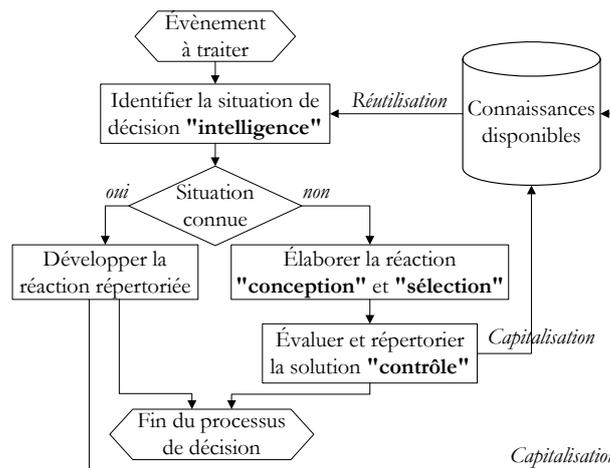


Figure I.9. Processus décisionnel de Cauvin [Cauvin 05]

Les modèles que nous venons de présenter, malgré leurs particularités, possèdent plusieurs points communs :

- une analyse du problème à résoudre et de son environnement,
- une recherche d'information sur ce problème afin de construire des solutions possibles,
- une évaluation de ces solutions, selon des critères de sélection,
- une sélection de la solution la plus adaptée, au vu des critères et du problème considéré,
- une application de cette solution,
- un suivi et une capitalisation de cette solution après son application.

Ces modèles de processus décisionnel montrent bien la succession d'étapes nécessaires à une prise de décision et la complexité des activités décisionnelles qui font appel à différents mécanismes.

I.3.1.3 Courants de recherche en décision

La décision fait appel à un large domaine de recherche. Les travaux de recherche en décision peuvent être classés en deux approches distinctes : analytiques et descriptives.

I.3.1.3.1 Approches analytiques et aide à la décision

Les approches analytiques sont des approches rationnelles dont l'objectif est de traduire le problème décisionnel selon une formulation mathématique composée d'une fonction à optimiser : une fonction d'utilité de la décision, pouvant être accompagnée de contraintes traduisant le contexte de la décision.

Ces approches sont basées sur la théorie de la décision, avec des auteurs comme Sfez [Sfez 84] ou Kast [Kast 93].

Les méthodes d'aide à la décision ont également une approche analytique de la décision.

L'aide à la décision est une discipline qui s'adresse à un large public qui va des dirigeants d'entreprise au simple particulier, en passant par les concepteurs et autres décideurs. Elle peut intervenir et apporter des solutions aux décideurs, à chacune des étapes du processus décisionnel.

L'aide à la décision peut être définie comme une activité qui "prenant appui sur des modèles", offre des "éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision" [Roy 85]. Elle va fournir au décideur des pistes de solutions pouvant répondre aux objectifs décisionnels, de manière complète ou seulement partielle.

L'aide à la décision ne peut être dissociée des critères permettant de faire le choix décisionnel. La décision peut être de type monocritère ou multicritère et, selon ces deux types de décision, les méthodes d'aide à la décision seront différentes.

En décision monocritère, les objectifs à atteindre peuvent être assimilés à un seul critère. Il sera donc relativement aisé de réaliser un choix en fonction d'un critère unique.

Par contre, la décision sera multicritère si les différents objectifs que la décision doit atteindre ne peuvent pas être agrégés.

Pour traiter la décision multicritère, il existe des méthodes qui peuvent être classées selon plusieurs caractéristiques : la rationalité des décideurs, les univers décisionnels, la nature de la démarche, les types de solutions fournies,... Nous présentons une classification inspirée des travaux de Berchet [Berchet 00], de Jaziri [Jaziri 04] et de Chakhar [Chakhar 06] :

- approches hiérarchiques qui consistent à décrire le problème dans une structure hiérarchique partant de l'objectif de la décision, pour détailler jusqu'aux différents choix possibles, pour ensuite affecter des poids à chaque niveau de la hiérarchie, par exemple : méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) de Saaty [Saaty 80],
- approches d'agrégation totale qui résument le problème décisionnel par une fonction à optimiser, avec des contraintes traduisant le contexte du problème, par exemple : la programmation linéaire avec l'algorithme du simplexe,
- approches dites de surclassement (ou d'agrégation partielle), comptant les méthodes les plus utilisées, également différenciables selon la nature de la problématique décisionnelle (choix, tri, rangement, description [Roy 85]) ; ces méthodes consistent à comparer deux à deux les actions potentielles et à les classer, par exemple : la méthode ELECTRE [Roy 91],
- approches itératives (ou d'agrégation locale) qui sont basées sur une démarche répétitive où à chaque pas la solution est localement améliorée afin de se rapprocher d'une solution possible mais pas forcément optimale.

Ces approches analytiques ne seront pas considérées dans nos travaux car elles n'intègrent pas les dimensions cognitives, subjectives, faisant partie intégrante d'une décision prise par un être humain.

1.3.1.3.2 Approches descriptives

La seconde famille d'approches permettant d'appréhender la décision est de nature descriptive. Ces approches prennent leur origine dans les travaux en sciences de l'ingénieur, de l'information ou encore en sciences cognitives ou en psychologie.

Nous pouvons citer des auteurs faisant office de référence dans le domaine de la décision avec Simon, Le Moigne ou des auteurs plus récents comme Berchet [Berchet 00] ou encore Trentesaux [Trentesaux

02] qui s'intéressent à la décision stratégique, au pilotage ou à la conduite de processus et qui ont des préoccupations comparables aux nôtres.

Longueville et Lardeur se concentrent sur l'application de la décision dans le domaine industriel et, plus particulièrement, sur les projets d'innovation dans l'automobile [Longueville 03], [Lardeur 04]. Ils proposent un cadre de modélisation permettant de prendre en compte les enjeux décisionnels et les enjeux de conception propres à la conception de nouveaux produits.

Nous allons nous appuyer sur ces approches descriptives pour analyser les scénarios de e-maintenance en fonction des activités de décision collaborative (cf. paragraphe I.3.3.4).

I.3.1.4 Systèmes associés à la décision

Dès les années soixante, Simon [Simon 60] évoque l'idée de dispositifs pouvant être associés à la décision et aider un décideur à faire un choix. La mise en relation de l'homme et de la machine a fait apparaître la notion de SIAD : Système Interactif d'Aide à la Décision. Un SIAD doit répondre à certains critères de conception afin d'être utile au décideur et utilisé par celui-ci. Un SIAD doit gérer un ensemble d'informations pouvant aider à une décision, en prenant soin d'avoir une information fiable, mise à jour et apportant une certaine valeur ajoutée permettant d'améliorer la qualité de la décision.

Les travaux actuels en termes de systèmes d'aide à la décision font référence aux outils DSS (Decision Support Systems). Citons, par exemple, les travaux de Zolghadri qui sont centrés sur les DSS, avec la conception d'un outil de DSS à partir des techniques de modélisation d'entreprise [Zolghadri 02]. Dans les travaux de Vahidov, un état de ces outils et de leurs fonctionnalités est réalisé [Vahidov 04].

Un couplage entre les environnements de gestion intégrée que sont les ERP (Enterprise Resource Planning) et les systèmes d'aide à la décision peut également être fait. Les ERP sont des outils qui permettent de regrouper dans le même outil logiciel les systèmes de gestion de la production, financière, de la maintenance,... d'une entreprise. Ammar [Ammar 04] présente les apports de l'utilisation des ERP sur chacune des quatre étapes du processus décisionnel défini par Simon. Il évoque également les effets que les ERP peuvent avoir sur la décision, au sein d'une entreprise, en permettant au décideur d'accéder à des informations, de les partager,... Nicolaou [Nicolaou 04] précise cette idée de corréler ERP et décision, en évoquant les facteurs de réussite et d'échec d'implantation d'un ERP et les conséquences que cela peut avoir sur les décisions d'une entreprise. Il montre également la nécessité de bien préparer l'implantation d'un ERP afin d'en limiter les échecs.

Les travaux que nous venons de présenter concernant la décision mettent en évidence les enjeux complexes que cette activité sous-tend. Avec les systèmes d'aide à la décision, nous avons montré que les évolutions technologiques touchent également la décision. Cependant, le manque de techniques permettant de modéliser les activités de décision doit être souligné.

I.3.2 Le travail collaboratif

Les travaux de recherche concernant le travail collectif ont été développés avec les évolutions organisationnelles des entreprises qui sont de plus en plus collectives [Shim 02].

Dans la littérature, plusieurs notions font référence à un travail en groupe, en collectif. Ce paragraphe a pour objectif de comparer ces différentes notions et d'analyser l'actualité des travaux en collaboration

en les confrontant à notre problématique qui se concentre sur l'étude des mécanismes de travail de plusieurs acteurs de maintenance.

I.3.2.1 Différentes formes de travail collectif : coopération vs collaboration

I.3.2.1.1 Définitions étymologiques et terminologiques

Nous partons des origines étymologiques pour définir les différentes formes de travail collectif. Ces différentes notions sont regroupées dans le [Tableau I.6](#). Il s'agit des mécanismes élémentaires contribuant aux échanges d'un collectif avec la communication, la coordination et la négociation ainsi que des principales formes de travail collectif avec la coopération, la collaboration et la codécision.

<i>Termes</i>	<i>Origines étymologiques</i>	<i>Définitions du dictionnaire</i>
Communication	Issue du verbe latin "communicare" (cum + municus).	L'action de communiquer signifie "transmettre quelque chose à quelqu'un, établir une relation avec quelqu'un".
Coordination	Issue du verbe latin "coordinare" (cum + ordo) qui signifie agencer des éléments ensemble.	L'action de coordonner signifie "agencer des parties d'un tout selon un plan logique, pour une fin déterminée".
Négociation	Issue du verbe latin "negotiarī" qui signifie faire du commerce, faire des affaires.	L'action de négocier se traduit par "une série d'entretiens, d'échanges de vues, de démarches qu'on entreprend pour parvenir à un accord, pour conclure une affaire".
Coopération	Issue du verbe latin "cooperari" (contraction de cum + operari) qui signifie faire quelque chose, opérer conjointement avec quelqu'un, contribuer à une œuvre commune.	L'action de coopérer se traduit par "participer à une œuvre commune". Cette définition laisse sous-entendre une forme de solidarité, de partage et d'entraide.
Collaboration	Issue du verbe latin "collaborare" (cum + laborare) qui signifie travailler avec quelqu'un à quelque chose.	L'action de collaborer est synonyme de "travailler ensemble à une œuvre commune". Cette définition semble liée à une forme de production commune à plusieurs personnes, idée plus forte que celle de la coopération.
Codécision	Issue du verbe latin "decidere" qui signifie trancher et de "caedere" qui signifie ciseau.	L'action de codécider (soit la codécision) se traduit par "une décision prise en commun par plusieurs organismes compétents".

Tableau I.6. Récapitulatif des racines étymologiques et des définitions [Robert 04]

Les définitions des mécanismes de coordination, de négociation et de communication nous paraissent claires et ne pas prêter à confusion. Nous allons donc nous appuyer sur ces définitions pour nos travaux.

Par contre, la distinction entre les notions de coopération, de collaboration ou encore de codécision, nous paraît confuse. Nous allons approfondir ces notions en nous intéressant aux différents courants de recherche les concernant pour, ensuite, employer les notions adéquates dans nos travaux.

I.3.2.1.2 Courants et travaux de recherche existants sur le travail collaboratif

Les principaux courants de la littérature proposant une définition de ces termes sont regroupés dans le [Tableau I.7](#).

Domaines	Références
Informatique : Intelligence Artificielle, Systèmes Multiagents	[Ferber 95] [Roche 00] [Schwartz 02] [Jennings 01] [Strauss 78] [Verrons 04]
Informatique : outils logiciels de travail en groupe ou CSCW (Computer Supported Cooperative Work) / TCAO (Travail Coopératif Assisté par Ordinateur)	[Bardram 98] [Gzara 06] [Rodden 91] [Benali 03] [Laborie 06] [Schael 97] [Betbeder 03] [Lubich 95] [Soubie 05] [David 97] [Maber 98] [Tarpin 97] [Ellis 91] [Saikali 01] [Villemur 95] [George 01]
Sciences Humaines et Sociales : Sociologie, Psychologie,...	[Bannon 89] [Jermann 99] [Pruitt 81] [De Michelis 95] [Mattessich 92] [Schmidt 90] [De Terssac 96]
Économie, Gestion des Entreprises	[Cissé 99] [Huet 04] [Voisin 00] [Cullen 00] [Neuville 96] [Zaibet 06] [Dameron 03] [Thomassen 01]
Éducation, Apprentissage	[Dillenbourg 96] [Roschelle 95] [Winer 94]
Sciences pour l'Ingénieur, Génie Industriel	[Burlat 01] [Kraemer 88] [Reynaud 97] [Boujut 02] [Lauras 04] [Rionx 02] [Gavirneni 01] [Despontin 04] [Roboam 93] [Hadj 04] [Monteiro 01] [Telle 03] [Kalafatis 02]
Conception/design, architecture	[Chiu 02] [Kvan 00] [Vera 98]

Tableau I.7. Différents courants ayant contribué à distinguer les formes de travail collectif

Parmi ces travaux, nous allons seulement considérer ici ceux qui permettent de distinguer les différentes formes de travail collectif afin de positionner nos propres développements.

En ce qui concerne les outils informatiques dédiés au travail collectif, de nombreux travaux existent. Ces travaux abordent les environnements logiciels permettant à un collectif de travailler ensemble. Parmi ces auteurs, Lubich propose une hiérarchisation en niveaux des différentes formes de travail collectif que constituent la coopération, la collaboration et la codécision [Lubich 95]. Cet auteur distingue la coopération et la collaboration, en plaçant la collaboration à un niveau plus fort que la coopération, avec l'idée de partage de ressources, de contribution collective à la réalisation d'une même activité et de retours positifs ou négatifs provoqués par les résultats de la décision. Selon Lubich, la codécision concerne les décisions prises par un groupe d'acteurs avec création et partage de connaissances.

George propose une distinction intéressante entre coopération et collaboration selon le caractère individuel ou collectif de réalisation des activités et des buts / sous-buts [George 01]. La représentation de la Figure I.10 permet de résumer cette distinction.

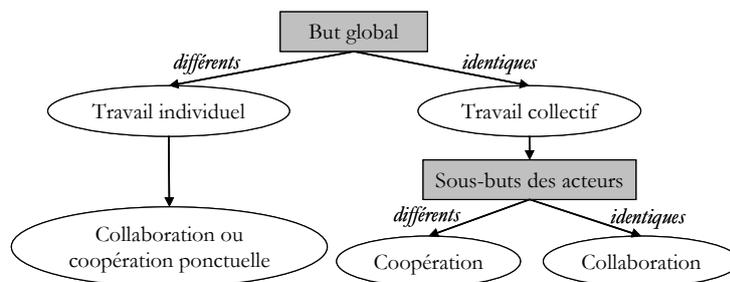


Figure I.10. Distinction de la coopération et de la collaboration [George 01]

George distingue la coopération et la collaboration selon que les acteurs ont les mêmes buts et sous-buts ou qu'ils sont différents. Une activité collective (avec un but global identique), avec des sous-buts (ou des activités secondaires) différents, correspond à une activité de coopération. La collaboration correspond à des sous-buts identiques (des activités secondaires réalisées de manière collective) et, ce, quel que soit le but global, identique ou différent pour l'ensemble du groupe.

Nous nous sommes également intéressés aux travaux en Sciences Humaines et Sociales même s'ils ne font pas couramment partie de nos thématiques de recherche. Ce domaine de recherche étudie les mécanismes entre individus, en se focalisant sur les aspects relationnels, subjectifs que des pratiques communautaires, collectives peuvent engendrer, tout en tenant compte de la complexité du raisonnement humain et de ses particularités. Néanmoins, des auteurs comme De Michelis ont contribué à différencier coopération et collaboration, avec une logique semblable à celle de Lubich, en organisant coopération, collaboration puis codécision selon un degré de mise en commun et de dépendance croissant [De Michelis 95].

Dans le domaine de l'éducation et de l'apprentissage à distance, les auteurs comme Winer ou Mattessich proposent une autre hiérarchisation, en accord avec celle de Lubich. Le travail de Winer est basé sur une étude des activités d'apprentissage et sur des exemples de situations de collaboration dans le domaine de l'éducation. Winer [Winer 94] distingue la coopération, la coordination et la collaboration. Une synthèse des définitions de Winer est présentée dans le [Tableau I.8](#). Pour lui, la coopération est le premier niveau de travail collectif. Ensuite, il place la coordination et, enfin, la collaboration qui est la forme engageant et liant le plus les participants dans le travail de groupe.

Niveaux d'intensité	Définitions
1 : Coopération	La coopération est une relation informelle et à court terme, sans mission clairement définie, où chaque coopérant recherche des informations qui l'intéressent. Les informations ne sont partagées que selon les besoins. Chaque organisation garde son autorité, ses ressources et les récompenses séparées, il n'y a pas de risque à travailler ensemble.
2 : Coordination	La coordination est une relation plus formelle qui nécessite des planifications et une division des rôles de chacun. Elle ouvre des canaux de communication entre les organisations concernées. L'autorité reste dans chaque structure individuelle même si la prise de risque augmente, avec une possibilité de problème de répartition de pouvoir, d'influence. Les ressources sont disponibles pour les participants et les récompenses sont mutuellement reconnues.
3 : Collaboration	La collaboration est une relation plus durable et plus prenante. Elle est bien définie et se veut mutuellement bénéfique pour les organisations concernées afin d'atteindre des buts communs. Les participants voient leurs organisations respectives mises en commun dans une nouvelle structure, avec un engagement complet dans la mission commune. Ce type de relation de groupe implique une planification efficace et des canaux de communication définis à tous les niveaux de l'organisation. C'est la structure collaborative formée qui détermine les autorités qui s'exercent. Le risque encouru est plus grand puisque chaque participant met en commun ses ressources et sa réputation pour le bon fonctionnement de la structure collaborative. De même, les résultats et récompenses sont partagés. Le pouvoir peut ainsi poser problème car il peut s'avérer inégal par rapport aux organisations d'origine des participants.

Tableau I.8. Définition de la coopération, la coordination et la collaboration [Winer 94]

Les travaux de Winer ont été largement repris dans la littérature. Leur ancienneté et les citations de ses définitions servant de référence à d'autres auteurs, confèrent une certaine légitimité aux définitions. Winer a notamment inspiré les travaux de [Mattessich 92], [Kvan 00], [Laborie 06].

D'autres auteurs comme [Roschelle 95], [Dillenbourg 96] ou encore [Zaibet 06] proposent la même distinction de coopération et collaboration que Winer.

Par contre, en Sciences pour l'Ingénieur, les définitions sont nombreuses, mais pas toujours très claires et parfois même contradictoires. Pour Erschler (Chapitre de l'ouvrage collectif [De Terssac 96]), la coopération est assimilée à la négociation. Pour [Monteiro 01], la coopération et la coordination d'activités sont deux notions synonymes. Pour [Telle 03] et [Lauras 04], la collaboration est moins forte que la coopération. La codécision peut également être assimilée à de la coopération ou à de la collaboration selon [Boujut 02] et [Despoutin 04].

Néanmoins, certaines définitions restent cohérentes et nous semblent intéressantes à noter, comme celle de Gavirneni : "la coopération caractérise la mise à disposition d'une information qui peut être utilisée pour accroître la pertinence d'une décision" [Gavirneni 01].

Selon Hadj-Hamou, la réactivité et la pertinence d'un ensemble de personnes collaborant nécessitent la mise à disposition "d'un espace commun pour stocker et partager des informations pour qu'elles soient disponibles facilement pour tous les participants" [Hadj 04].

1.3.2.1.3 Proposition de distinction

De nos jours, le travail en groupe est à la base de toute organisation. Nous avons présenté les dénominations associées au travail collectif. La synthèse des définitions existantes du paragraphe précédent nous a fait prendre conscience de la difficulté que ces notions assez proches de coopération, collaboration ou codécision peuvent engendrer.

Les mécanismes de gestion d'activités de groupe sont présents pour :

- échanger des informations (communication),
- ordonner, agencer des activités (coordination),
- résoudre des conflits (négociation).

Les différences entre ces trois mécanismes nous semblent claires ; nous allons donc adopter dans nos travaux, les définitions présentées au paragraphe 1.3.2.1.1.

Pour les termes coopération, collaboration et codécision, les définitions qui caractérisent assez bien les particularités de la langue française ne sont pas totalement synonymes et ces termes méritent d'être distingués.

Après avoir analysé les définitions existantes (cf. paragraphes 1.3.2.1.1 et 1.3.2.1.2), nous adoptons le classement de Winer du travail collectif [Winer 94] et nous proposons les définitions suivantes qui sont résumées dans le Tableau I.9.

<i>Formes de travail collectif</i>	<i>Définitions proposées</i>
1 : Coopération	Un ensemble d'acteurs est dit coopérant si ces acteurs participent à une activité commune en réalisant individuellement une partie de cette activité. Il s'agit simplement d'une participation ponctuelle à une activité collective, sans engagement durable des acteurs qui coopèrent. L'activité collective est segmentée en activités individuelles, réparties entre les acteurs coopérants. Chaque acteur de la coopération garde son organisation, ses ressources et ses objectifs propres.
2 : Collaboration	Un ensemble d'acteurs est dit collaborant si ces acteurs travaillent ensemble à une production commune, avec un objectif commun et si chacun réalise une partie de l'activité du groupe. Les acteurs partagent leurs ressources, leurs informations, moyens de production, ... Ce partage peut être réalisé au sein d'un espace commun afin d'avoir l'ensemble des ressources du groupe disponibles pour tous les acteurs. Les acteurs partagent également les résultats (positifs ou négatifs) avec la notion de risque partagé en cas d'échec du groupe.
3 : Codécision	Une codécision correspond à une prise de décision réalisée par un groupe, en commun. Cette décision est l'aboutissement d'un travail commun en partageant des ressources et les objectifs. Une organisation commune à l'ensemble des acteurs du groupe peut être créée à partir des organisations d'origine.

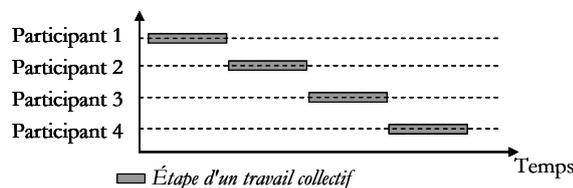
Tableau I.9. Nos définitions des formes de travail en groupe

Pour nos travaux, nous avons retenu la notion de décision collaborative. Nous considérons que les acteurs de maintenance qui travaillent ensemble peuvent garder partiellement des missions individuelles. Il ne s'agit donc pas de codécision mais plutôt de décision collaborative où les acteurs sont moins contraints par le travail collectif.

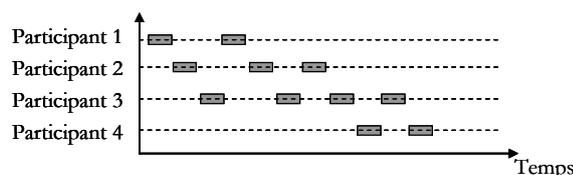
1.3.2.2 Modes de collaboration

1.3.2.2.1 Planification des tâches

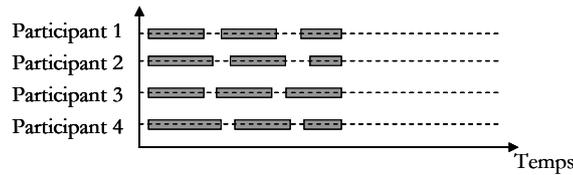
L'organisation des activités collaboratives et la gestion des intervenants peuvent vite devenir difficiles avec une augmentation du nombre d'acteurs intervenant dans la collaboration. Pour essayer de pallier cette difficulté, l'organisation, la planification et la répartition des tâches entre les acteurs peuvent être une solution. Ainsi, Tarpin-Bernard qui travaille dans le domaine du Travail Coopératif Assisté par Ordinateur (TCAO) [Tarpin 97] décline trois principaux modes de collaboration selon la répartition entre les acteurs et le traitement des activités au cours du temps (cf. Figure I.11).



a. Mode de collaboration séquentiel pur



b. Mode de collaboration séquentiel itératif



c. Mode de collaboration concurrent

Figure I.11. Trois modes de collaboration [Tarpin 97]

Dans nos travaux, nous envisageons d'étudier le travail collaboratif selon le mode séquentiel itératif et le mode concurrent. Ce choix est motivé par les gains de temps associés à la mise en parallèle des processus, ce qui peut améliorer la collaboration entre acteurs de maintenance que nous étudions.

1.3.2.2 Classification temps et espace

La collaboration peut également être classée selon deux principaux critères [Jobansen 89], [Schmidt 90], [Ellis 91], [Rodden 91] : temps (synchrone et asynchrone) et espace (même lieu ou à distance), représentés sur le Tableau I.10.

	Même lieu	Lieu différent
Même temps	Collaboration synchrone coïncidente Réunion face à face (vidéo projecteur, tableau blanc,...)	Collaboration synchrone distribuée Réunion virtuelle (visioconférence, partage d'application,...)
Temps différent	Collaboration asynchrone coïncidente Mémoire électronique (intranet, base de données,...)	Collaboration asynchrone distribuée (courrier électronique, Internet, workflow, forum,...)

Tableau I.10. Classification des modes de collaboration selon les critères temps et espace

Cette classification spatio-temporelle peut contribuer à la classification des outils logiciels aidant au déroulement des activités collaboratives qui est abordée au paragraphe suivant.

Notre approche de la collaboration va aborder ces quatre modes de collaboration spatio-temporelle. Dans nos travaux, nous allons privilégier la collaboration synchrone distribuée qui pourra se transformer en collaboration asynchrone distribuée en cas d'indisponibilité temporaire d'un acteur.

1.3.2.3 Outils de collaboration

1.3.2.3.1 Définitions des notions de TCAO et de Groupware

La collaboration étant une activité collective qui nécessite de gérer les ressources requises, les activités la composant, les acteurs intervenant,..., des outils logiciels dédiés peuvent aider et supporter les activités collaboratives en proposant un environnement de travail à un groupe d'acteurs collaborant avec diverses fonctionnalités selon les outils. La notion de TCAO (Travail Coopératif Assisté par Ordinateur) et de CSCW (Computer Supported Cooperative Work) en anglais font référence à ces outils et au domaine de recherche associé. Pour Bannon, le CSCW est un domaine de recherche qui englobe tous les supports d'activités à base d'ordinateurs dans lesquelles plusieurs personnes sont impliquées [Bannon 89].

Un autre terme, proche de celui de CSCW, est celui de Groupware (ou collecticiel), signifiant littéralement "outil logiciel pour un groupe". Selon Ellis, un Groupware est un système informatisé qui

apporte un soutien à des groupes de personnes engagées dans une activité commune (ou but) et qui fournit une interface avec un environnement partagé [Ellis 91].

1.3.2.3.2 Classification des outils collaboratifs

Les outils collaboratifs ou CSCW qui aident au déroulement d'activités collaboratives sont de différentes natures, avec des fonctionnalités diverses. Plusieurs classifications existent dans la littérature, une des plus anciennes et des plus courantes est celle d'Ellis [Ellis 91] avec le modèle des 3 C : communication, coordination et collaboration (Figure I.12).

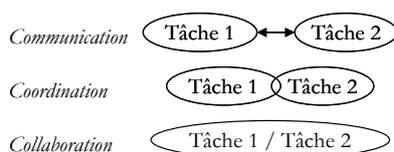


Figure I.12. Modèle des 3 C [Ellis 91]

Avec ce modèle, Ellis fait la distinction entre :

- les outils de communication : mail, chat, visioconférence, messagerie instantanée,...
- les outils de coordination : workflow, agenda partagé,...
- les outils de collaboration : partage de documents, forum, communautés virtuelles,...

Ladame [Ladame 07] apporte un complément au modèle d'Ellis en ajoutant un quatrième C, celui de la connaissance. Cette classe d'outils de connaissances fait référence aux outils de gestion des compétences, moteurs de recherche,...

Parmi les outils collaboratifs, les workflows (traduction littérale signifiant "flux de travail") sont le plus souvent intégrés à la catégorie des outils de coordination même si certains auteurs préfèrent les différencier des collecticiels [Saikali 01], [Betbeder 03].

Malgré une certaine confusion régnant autour de cette notion de workflow, Saikali [Saikali 01] apporte des éléments de distinction entre un collecticiel et un workflow. Selon Saikali, les collecticiels permettent de gérer des activités collaboratives synchrones et asynchrones alors que les workflows sont centrés sur des activités asynchrones avec des fonctionnalités permettant de coordonner et d'organiser les activités de processus.

Betbeder [Betbeder 03] définit le workflow comme étant "un environnement permettant un enchaînement automatisé des différentes opérations et étapes d'une activité complexe". Le workflow a pour objectif de faciliter la réalisation des tâches des acteurs, la gestion des flux d'information dans une organisation, tout en permettant de partager des informations entre acteurs impliqués dans un processus commun.

Les outils de CSCW ne sont pas directement étudiés dans nos travaux même si nous supposons que les acteurs peuvent les utiliser, sans préciser davantage les conditions ou contraintes d'utilisation que ces outils peuvent induire.

1.3.2.4 Courants de recherche en travail collaboratif

Nous venons d'évoquer un des courants de recherche important du travail collaboratif avec les outils collaboratifs servant de support logiciel, d'intermédiaire entre des acteurs collaborants [Villemur 95], [Tarpin 97]. Cependant, d'autres domaines de recherche s'intéressent également au travail collaboratif dans des contextes variés ; nous allons en évoquer quelques-uns dans ce paragraphe.

Des domaines de recherche concernant la chaîne logistique et les réseaux d'entreprise considèrent la collaboration entre entreprises. Citons, par exemple, Telle qui s'intéresse à la relation entre un fournisseur et son donneur d'ordres [Telle 03]. Mahmoudi évoque la notion de risque à instaurer une collaboration avec des entreprises et propose pour cela une démarche de modélisation permettant d'identifier la prise de risque et ainsi de le maîtriser [Mahmoudi 06]. Nous pouvons également évoquer les travaux de Galasso dans lesquels l'auteur étudie la planification sur l'ensemble d'une chaîne logistique nécessitant notamment la prise en compte des contraintes de chaque entreprise de la chaîne logistique [Galasso 07].

Dans le domaine de l'éducation et de l'apprentissage, des auteurs ont pris conscience des apports du travail collaboratif. De nombreux travaux ont intégré la dimension collaborative et, ce, depuis plusieurs années, comme en témoignent les travaux de Winer [Winer 94], [Dillenbourg 96]. Dufresne propose un modèle de gestion de l'apprentissage à distance qui a pour objectif de représenter les systèmes d'assistance à l'apprentissage pour les acteurs concernés (apprenant, formateur ou concepteur du système d'aide) [Dufresne 03]. Ce courant de recherche fait apparaître la notion de CSCL (Computer Supported Collaborative Learning) en comparaison au CSCW (Computer Supported Cooperative Work). On y trouve des auteurs comme George [George 01] qui propose un environnement collectif d'apprentissage à distance ou Sidir [Sidir 04] et Fauré [Fauré 07] qui ont étudié les modes de collaboration existants lors d'expérimentations de l'utilisation de systèmes de formation à distance par un ensemble d'apprenants. D'autres travaux, comme ceux de Holliman, s'intéressent à la collaboration dans le cadre de conférences réalisées à distance, via un dispositif informatique permettant une collaboration synchrone et distribuée [Holliman 06].

Les domaines du concurrent engineering et de la conception collaborative méritent également d'être cités. Dans les travaux [Willaert 98], [Roche 00] et [Girard 06], les auteurs mettent en lumière les enjeux et difficultés de l'ingénierie concurrente ou "concurrent engineering" liés à l'évolution des modes de travail vers un travail en équipe avec la nécessité de produire des résultats ensemble.

Dans les travaux de Kvan [Kvan 00] et de Chiu [Chiu 02], la problématique de la conception collaborative réalisée par des équipes projets est abordée. Dans les travaux de He, cette problématique est approfondie, en prenant appui sur les outils commerciaux de conception assistée par ordinateur pour supporter des activités de conception collaborative [He 06]. Anumba propose d'utiliser les systèmes multiagents pour modéliser, à l'aide d'agents intelligents, les situations de conception collaborative en construction [Anumba 02].

Les travaux concernant la collaboration, les formes de travail collectif et les modes de collaboration nous permettent de préciser les conditions de la collaboration dans notre étude en nous appuyant sur les travaux existants. Nous avons proposé une distinction des principales formes de travail collectif afin de justifier le terme de collaboration employé dans nos travaux.

1.3.3 Le mécanisme étudié dans nos travaux : la décision collaborative

Après avoir présenté séparément la décision et la collaboration, nous abordons le mécanisme au centre de nos travaux : la décision collaborative. Un courant de recherche s'est récemment constitué sur cette thématique.

I.3.3.1 Concepts fondamentaux : définitions et processus existants

I.3.3.1.1 Définitions de la décision collaborative dans la littérature

Dans le domaine de recherche dédié à l'informatique et aux outils collaboratifs (de type CSCW,...), Karacapilidis associe la décision collaborative à un processus "argumentatif" où chaque participant doit tenir compte des autres collaborateurs pour comprendre les contraintes et les solutions au problème posé, les intérêts et les priorités de chacun [Karacapilidis 01].

En intelligence artificielle et système multiagents, Panzarasa propose la définition d'une prise de décision collaborative comme étant associée à un groupe d'agents distribués qui coopèrent pour atteindre des objectifs supérieurs aux capacités individuelles des agents. Une prise de décision collaborative est généralement associée à un mode de raisonnement distribué selon lequel un groupe d'agents travaillent en collaboration via un espace commun de recherche [Panzarasa 02].

En Sciences pour l'Ingénieur, Laborie définit l'activité de prise de décision collective comme une "convergence d'interactions cognitives et visuelles, planifiées ou opportunistes, où des personnes acceptent de se rassembler pour un objectif commun, dans une période définie, soit au même endroit, soit dans des endroits différents, dans le but de prendre des décisions" [Laborie 06].

Dans le même domaine, Jankovic définit la décision collaborative comme une décision collective où chaque acteur a des objectifs différents et, souvent même, conflictuels avec les autres acteurs intervenant dans le processus de prise de décision [Jankovic 06].

Ces définitions mettent à nouveau en évidence (comme au paragraphe I.3.2.1 avec la définition du travail collaboratif) les différences de point de vue et de dénomination des auteurs travaillant sur cette problématique. Néanmoins, ces définitions confirment la possibilité, pour les acteurs collaborant, de poursuivre des objectifs distincts les uns des autres et celle d'une alternance de travaux collectifs et individuels au sein d'activités de décisions collaboratives.

Ce dernier point est également mis en évidence dans les processus existants présentés dans le paragraphe suivant.

I.3.3.1.2 Processus existants

Le processus de décision collaborative traduit le déroulement d'une activité assez complexe, pour laquelle il est difficile de trouver une définition consensuelle. Les modèles de processus existants concernent, pour la plupart, l'activité de conception. Voici deux exemples suivis d'un autre modèle de décision collective plus générique.

Kvan et Vera proposent un modèle de processus de conception collaborative [Kvan 00]. Ils décomposent l'activité de conception en une succession d'étapes individuelles ou collectives (Figure I.13). Ces auteurs considèrent que les acteurs de la collaboration peuvent travailler individuellement sur des portions du problème.

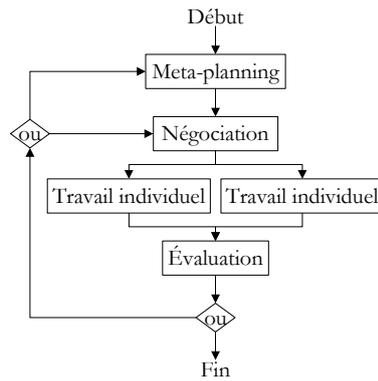


Figure I.13. Modèle du processus de conception collaborative [Kvan 00]

Chiu travaille également sur les processus de conception collaborative [Chiu 02] et propose un processus cyclique permettant de reboucler tant que l'objectif recherché n'est pas atteint (Figure I.14).

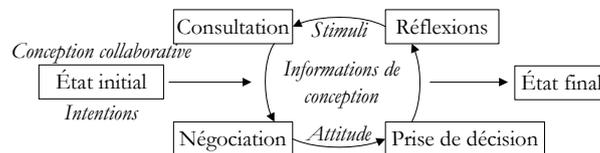


Figure I.14. Modèle du processus de conception collaborative [Chiu 02]

Laborie propose également un modèle du processus de décision collective, en s'inspirant notamment du processus de Kvan et Vera mais en lui conférant un caractère plus générique. Sa représentation du processus de décision collective est résumée sur la Figure I.15.

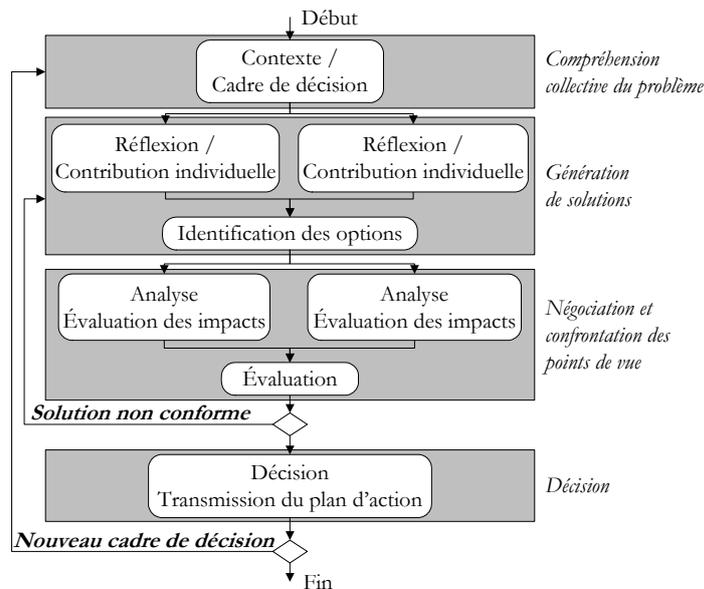


Figure I.15. Modèle du processus de décision collective [Laborie 06]

Ces trois modèles mettent en évidence la complexité des étapes de construction d'une décision et l'alternance des modes séquentiels et concourants de collaboration (présentés au paragraphe 1.3.2.2) conduisant à la parallélisation du travail des acteurs collaborant. Nous allons nous appuyer sur ces modèles pour proposer la définition d'un processus de décision collaborative.

1.3.3.2 Travaux actuels en décision collaborative

L'actualité des travaux en décision collaborative peut être abordée de manière similaire à celle des travaux en décision ou en travail collaboratif.

Les approches théoriques de la décision s'intéressent également à la décision collaborative. Ryan s'est attaché à formuler une fonction d'utilité de la décision collaborative, avec l'objectif d'optimiser cette activité [Ryan 02]. Xiao se base sur la théorie des jeux propre à la décision afin de modéliser la décision collaborative dans le cadre de conception collaborative, intégrant ainsi l'aspect multidisciplinaire de la collaboration dans son approche de modélisation formelle [Xiao 05]. Limayem propose d'utiliser une méthode de tri appartenant aux méthodes d'aide à la décision afin d'aborder la décision collaborative en gestion de projet [Limayem 01].

Nous retrouvons les travaux appliqués aux activités industrielles de conception. Laborie s'intéresse à la décision collaborative appliquée au processus de conception concourante dans le domaine aéronautique. Pour cela, il propose la mise en place de salles dédiées aux activités de conception avec un ensemble d'outils collaboratifs à disposition des acteurs intervenants [Laborie 06].

Jankovic se positionne sur un domaine assez proche de celui Laborie avec l'automobile [Jankovic 06] mais cet auteur propose une approche plus conceptuelle, en définissant une méthodologie de modélisation des mécanismes de décision collaborative.

Dans ses travaux, Fu se concentre également sur la décision collaborative en conception. Cet auteur met en évidence les besoins en connaissances auxquels la décision collaborative fait appel, tout particulièrement en conception [Fu 04].

L'évolution des modes de travail et l'avènement des TIC ont fait apparaître, depuis quelques années déjà, des travaux de recherche contribuant à la conception, l'intégration et l'utilisation d'outils informatiques, comme support au travail et à la décision collaborative. Ces travaux concernent également la préparation de l'implantation de ces outils aidant à la décision d'une équipe. Citons, par exemple, les travaux de Kronsteiner où les auteurs se concentrent sur une étude des besoins concernant les environnements mobiles supportant la décision collaborative [Kronsteiner 05].

Dans ses travaux, Parsa présente l'utilisation d'un environnement Internet permettant de partager des connaissances dans le cadre de décisions collaboratives [Parsa 07].

Dans [Soubie 05], Soubie et Zaraté ont une approche conceptuelle de la décision collaborative, en analysant les mécanismes en présence dans les échanges collaboratifs. Ces auteurs intègrent la gestion des connaissances aux systèmes collaboratifs d'aide à la décision.

Les travaux de recherche en décision collaborative concernent plusieurs domaines applicatifs (l'automobile, l'aéronautique,...). Nous pouvons compléter avec les travaux de Chim abordant la décision collaborative via Internet et appliquée en construction [Chim 04], ceux de Wambsganss sur la gestion du trafic aérien [Wambsganss 01] ou encore de Lario sur la décision collaborative dans la chaîne logistique [Lario 03].

Ces travaux nous apportent des éléments de modélisation de la décision collaborative même s'ils n'approfondissent pas les mécanismes lui servant de support.

I.3.3.3 Décision collaborative en maintenance

En maintenance, les travaux de recherche s'intéressant aux problèmes décisionnels ou collaboratifs dans le contexte applicatif de la maintenance sont peu nombreux même si quelques travaux existent. Pellegrin a notamment essayé d'appliquer les concepts de la théorie de la décision aux enjeux de la maintenance [Pellegrin 97].

Malgré quelques exceptions, les travaux étudiant la décision collaborative en maintenance sont généralement liés au développement de plateformes d'instrumentation de e-maintenance (cf. paragraphe I.1.3.5). Citons, par exemple, les travaux de Saint Voirin [St Voirin 06] où des éléments de modélisation des systèmes coopératifs en e-maintenance sont proposés. Les travaux de Kolski sont plus anciens mais les auteurs se concentrent également sur l'étude d'un système de télémaintenance pour lequel ils étudient les apports et les aides pouvant intéresser un mainteneur aux différentes étapes d'une intervention lors de la prise d'une décision [Kolski 93].

Certains travaux, comme ceux de Brown, Kaffel ou Anke, se concentrent sur la décision en maintenance sans intégrer la dimension collaborative. Ces travaux proposent des architectures servant de support à la prise de décision [Anke 05] ou simplement une étude approfondie des mécanismes en présence en proposant des éléments de modélisation ou d'évaluation des situations étudiées [Brown 99], [Kaffel 01]. Ces travaux intègrent néanmoins le fait que pour les activités décisionnelles en maintenance, les besoins en informations (sur le problème, sur la manière de le résoudre,...) sont un pré requis nécessaire à toute décision.

En maintenance, les travaux dédiés à la décision collaborative sont encore moins approfondis que ceux du paragraphe précédent. Néanmoins, nous nous appuyons sur les travaux de Saint Voirin ou de Kaffel pour aborder l'accessibilité à des informations distantes nécessaires aux activités de e-maintenance et de décision prise en collaboration.

I.3.3.4 Proposition de formalisation de la décision collaborative

Après les éléments théoriques de définition et de modélisation et les exemples de travaux existants en décision et en collaboration appliqués à la maintenance, nous proposons une définition de la décision collaborative.

Une décision collaborative est associée à un processus, traduisant ainsi une succession d'étapes intermédiaires conduisant un groupe d'acteurs à une décision.

Une décision collaborative est l'activité d'un groupe d'acteurs travaillant ensemble, avec un objectif commun, tout en partageant des ressources et des moyens de communication. Cette activité conduit à une prise de décision, pas forcément commune.

Une décision collaborative peut être résumée de la manière suivante :

- chaque acteur appartenant au groupe n'est pas forcément impliqué dans la prise de décision, il peut simplement contribuer à une étape comme, par exemple, la recherche d'informations nécessaires à la décision,

- le niveau de responsabilité ou de compétence des acteurs joue un rôle important dans la prise de décision (par exemple, si deux mainteneurs réalisent une intervention, le plus souvent, l'un deux, ayant plus de responsabilités que l'autre, prendra au final la décision même si le second l'aide dans cette tâche en lui fournissant les informations et connaissances en sa possession),
- une décision collaborative est associée à l'ensemble du processus et de ses intervenants conduisant à une prise de décision et non à la seule activité décisionnelle prise par un collectif (correspondant à la codécision),
- les acteurs collaborant ne sont pas forcément humains, une collaboration homme-machine est également possible et sera abordée dans nos travaux.

REMARQUE. Notre approche de la décision collaborative ne prend pas en considération les enjeux humains, sociaux, psychologiques ou subjectifs de ce type d'activité qui font partie de courants de recherche comme ceux des Sciences Humaines et Sociales, par exemple.

Pour modéliser le processus collaboratif, nous retenons le modèle de Laborie [Laborie 06] (cf. paragraphe I.3.3.1.2, Figure I.15). Dans ce modèle, l'auteur met en évidence l'alternance de travaux individuels ou collectifs. Ce modèle reprend également les étapes classiques du processus décisionnel (intelligence, design, choice et review) défini par Simon [Simon 77]. Les apports des TIC dans l'accessibilité à des ressources immatérielles (connaissances et compétences) sont associés aux deux étapes individuelles : réflexion et analyse qui ont besoin des connaissances des acteurs impliqués.

CONCLUSION

Les évolutions technologiques et le contexte économique actuel provoquent d'importants changements dans les systèmes de maintenance. La fonction maintenance d'aujourd'hui s'oriente vers des solutions de e-maintenance avec une remise en cause de ses techniques de prise de décision, de ses modes de travail et l'accentuation des phénomènes collaboratifs qui se généralisent de plus en plus, notamment via les systèmes distribués.

Ces évolutions doivent être analysées afin d'établir leurs apports et leurs effets négatifs. Pour cela, il est nécessaire de les évaluer et de les contrôler. La synthèse bibliographique a montré que peu de travaux abordaient les effets négatifs pouvant être induits par les TIC dans une organisation de par les changements des modes de travail et leur mauvaise intégration et utilisation.

Au travers de cette synthèse bibliographique, nous avons présenté des travaux de recherche allant des techniques d'instrumentation des plateformes de e-maintenance à l'étude des mécanismes de décision collaborative. Ces travaux peuvent être classés en trois grandes catégories : les travaux appliqués, les approches métier et les travaux théoriques.

Les travaux appliqués mènent des approches dédiées à des cas industriels spécifiques, difficiles à généraliser à notre approche même s'ils offrent une vision concrète des difficultés organisationnelles rencontrées lors de mises en situation.

À l'inverse, les travaux théoriques offrent des modélisations plus ou moins complexes des activités de décision collaborative. Ces modélisations ne sont pas toujours en accord avec les contraintes réelles.

La plupart des approches métier se concentrent sur la décision collaborative dans des domaines assez éloignés de nos préoccupations comme, par exemple, la conception et celles qui abordent les enjeux des activités de maintenance n'intègrent pas la dimension décisionnelle.

Des manques sont à souligner, comme l'apport de connaissances facilité par les TIC, notamment en maintenance. Nous pouvons également indiquer l'insuffisance de techniques de modélisation des activités de décision collaborative. L'influence des TIC sur la performance de la maintenance est également peu abordée. Par contre, malgré une certaine imprécision sur la notion de collaboration, les mécanismes qui lui sont associés sont analysés, tant au niveau des définitions que des processus.

Face à ces constats, nous avons décidé de concentrer nos travaux sur les mécanismes de décision collaborative en e-maintenance dans le but d'en évaluer les performances.

Pour cela, nos travaux vont consister, d'une part, à analyser et à formaliser les processus décisionnels collaboratifs en intégrant l'influence des TIC et, d'autre part, à proposer les moyens d'évaluer la performance d'un service de maintenance supporté par les TIC.

La première partie de nos travaux consiste à modéliser les activités de maintenance en mettant en évidence les éléments clés de leur performance, notamment en ce qui concerne l'utilisation des TIC en maintenance. Nous allons également nous attacher à modéliser la décision collaborative, en nous concentrant sur les changements organisationnels provoqués par les TIC et la collaboration.

Dans la seconde partie, nous nous appuyons sur ces modélisations pour proposer une démarche de formulation et d'évaluation des activités de décision collaborative en e-maintenance, permettant de garantir et d'améliorer la performance de ces activités.



CHAPITRE II. LES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE ET LEUR ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL

INTRODUCTION

Notre objectif dans ce chapitre est de définir le cadre de l'étude, d'en délimiter le contexte, de formaliser le problème étudié et son environnement et de proposer une modélisation des activités de e-maintenance.

Notre problématique étant au croisement de plusieurs domaines, nous avons besoin d'une modélisation intégrant des aspects aussi variés que les ressources humaines et immatérielles, les contraintes des activités de maintenance, les TIC,...

Les modèles existants sont généralement centrés sur un domaine particulier (la fonction maintenance, les connaissances ou les compétences,...) et ne sont pas toujours paramétrables ; ils ne répondent que partiellement à nos attentes. C'est pourquoi il nous a paru essentiel de proposer une modélisation des activités de e-maintenance. Nous souhaitons une modélisation générique, compréhensible par tous, en particulier, par les entreprises, formée de modèles adaptables et paramétrables quelle que soit la situation d'intervention de maintenance considérée.

Nous avons choisi de situer nos travaux dans le cadre normatif ISO de représentation des processus. Dans ce cadre normatif, nous développons une approche de modélisation objet pour définir et mettre en évidence les composants clés de la performance des activités de e-maintenance. Nous définissons ainsi des modèles génériques.

Suite à cette modélisation, nous proposons un premier résultat avec la définition d'un cadre d'évaluation concernant les composants clés de la performance et spécifiant les différents indicateurs de performance, dont certains seront exploités dans le chapitre IV.

II.1 CONTEXTE DES TRAVAUX

Dans nos travaux, nous considérons des interventions de maintenance quelconques (actions correctives, préventives,...). Nous avons retenu le domaine manufacturier (ateliers de production) pour cadre applicatif car il constitue, selon nous, un cadre assez générique et il correspond à notre expertise des milieux industriels. 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 II.1](#). Nous avons ainsi pu appréhender les enjeux et contraintes d'un service de maintenance.

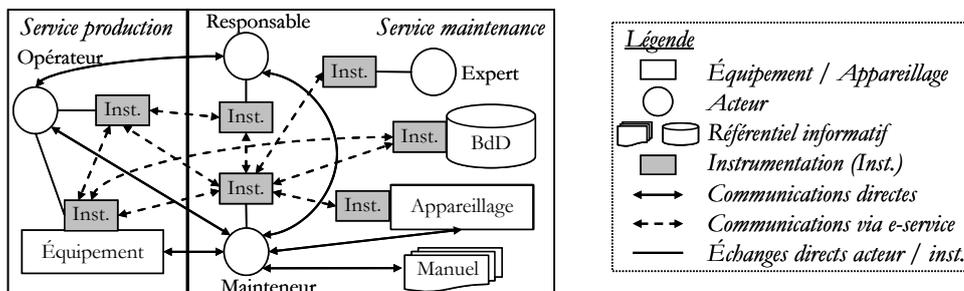


Figure II.1. Cadre du mainteneur en intervention

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

Les interventions de maintenance 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.

Nous distinguons ainsi :

- 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 (équipements de mesure et de diagnostic), outils et outillages (ressources utilisées par le mainteneur pour les opérations de démontage et remontage réalisées sur l'équipement) et, bien sûr, les pièces de rechange,
- les ressources immatérielles que constituent les données brutes ou traitées, les connaissances et les compétences nécessaires au traitement des interventions et à l'utilisation efficace des ressources matérielles ; elles sont présentes via les acteurs ou stockées dans les bases de données,
- les nouveaux outils de travail issus des TIC qui font apparaître une instrumentation des ressources, tant matérielles qu'immatérielles, portant sur les technologies d'accès, de traitement de données, d'informations ou de connaissances et d'échange entre acteurs à distance.

II.2 CADRE DE FORMALISATION PROCESSUS

II.2.1 Choix de la modélisation processus

Nos travaux se basent sur l'emploi d'un formalisme normalisé ; il s'agit de l'approche processus spécifiée par le cadre normatif ISO. Au-delà des contraintes induites par l'utilisation d'un formalisme normalisé, notre choix de l'approche processus est motivé par plusieurs raisons.

Ce formalisme est utilisé par les entreprises ; sa finalité est orientée vers la satisfaction du client, préoccupation permanente des entreprises. Son utilisation répandue dans le monde industriel en fait un moyen de formalisation reconnu. Les développements réalisés par son intermédiaire pour représenter des processus ou des activités plus ou moins complexes, seront un moyen de communication avec les entreprises car ils sont basés sur un "langage" que ces dernières comprennent. La première barrière de compréhension et de communication entre deux domaines différents est ainsi abolie.

Au-delà de cette reconnaissance par le monde industriel, la modélisation processus, de par son approche d'identification des processus, des flux clés d'une entreprise ou d'une organisation peut s'intégrer à des utilitaires de gestion d'entreprise. En effet, les outils logiciels facilitant la gestion des entreprises sont basés sur les mêmes principes de décomposition d'une entreprise, en intégrant la gestion des processus de fabrication, des ressources humaines, de la comptabilité ou encore de la maintenance. Ainsi, les modélisations processus des activités de e-maintenance offrent une garantie de compatibilité à des environnements informatisés de type gestion d'entreprise (ERP,...) ou gestion de maintenance (GMAO,...) existants.

La finalité de ces travaux étant la performance d'un système de e-maintenance et de son organisation, ils ciblent en particulier les responsables de service de maintenance. L'approche processus favorisera

l'organisation des activités du métier de la maintenance. La reconnaissance conférée à l'approche processus va permettre, lors d'une utilisation industrielle de nos travaux, une meilleure communication avec les acteurs visés et, ainsi, une meilleure compréhension.

Malgré les arguments que nous venons d'énoncer, les travaux scientifiques ayant les mêmes préoccupations sont encore peu nombreux. Citons néanmoins les travaux de Rakoto [Rakoto 04], où l'auteur s'appuie également sur les normes ISO 9000 pour représenter des processus industriels de retour d'expérience en maintenance.

Par contre, de nombreux travaux utilisent cette notion de processus, dans des applications de diverses natures, sans se référer obligatoirement à l'origine normative des processus. Nous pouvons évoquer les travaux de Bennour où les auteurs s'intéressent aux processus d'une entreprise à des fins d'évaluation ; l'estimation des performances de ces processus est centrée sur l'utilisation de ressources humaines que ces processus nécessitent [Bennour 07]. De même, les travaux de Forest associent les activités de conception et d'innovation à des processus ; l'étude réalisée dans [Forest 97] met en évidence les enjeux et mécanismes de ces deux processus. Un autre courant de recherche aborde les processus, il s'agit de la modélisation d'entreprise, citons, par exemple, les travaux de Ducq et Roque où les auteurs développent un langage de modélisation unifié UEML (Unified Enterprise Modelling Language) permettant de gérer les différents modèles et langages coexistant au sein d'une entreprise. Ce type de modélisation peut être associé au concept d'interopérabilité¹ en permettant aux différents modèles d'une entreprise d'être compatibles [Ducq 04], [Roque 08].

II.2.2 Cadre normatif ISO et approche processus

L'approche processus est un cadre de modélisation normalisé avec les séries 9000 de la norme ISO. La modélisation processus a été "labellisée" avec les versions des normes ISO 9000 version 2000 [ISO 9001 00]. La promotion de ce formalisme a d'ailleurs constitué une des évolutions majeures de la version 2000.

Une nouvelle version de la norme ISO 9001 est disponible depuis fin août 2008. Les modifications concernent essentiellement l'amélioration de l'énoncé des exigences et la compatibilité avec le référentiel environnemental ISO 14001. Nous allons donc garder comme référence la version 2000 de la norme ISO 9001, la version 2008 n'effectuant que des modifications mineures.

Les normes ISO de la série 9000 sont décomposées en trois référentiels ; elles sont détaillées dans le Tableau II.1 et comparées à la dénomination de 1994.

Version 2000	Définition	Version 1994
ISO 9000	Principes essentiels et vocabulaire du système de management de la qualité.	ISO 9000-1
ISO 9001	Exigences à respecter concernant le système de management de la qualité.	ISO 9001, 9002, 9003
ISO 9004	Lignes directrices permettant d'améliorer les performances de l'entreprise et de son système de management de la qualité afin de répondre aux exigences de la norme ISO 9001.	ISO 9004-1, 9004-2, 9004-3, 9004-4

Tableau II.1. Détail des normes de la série 9000 relatives à l'approche processus

¹ L'interopérabilité correspond à l'aptitude d'un système à s'intégrer à un autre système en permettant aux différents systèmes de communiquer entre eux, sans dépendance.

Nous prenons donc en référence les exigences de la norme ISO 9001 concernant l'approche processus d'une entreprise afin que nos développements soient conformes aux critères de définition et de représentation d'une organisation. Cette norme définit les contraintes à respecter concernant le management de la qualité et l'organisation de l'entreprise, afin de lui permettre de maîtriser la qualité de ses produits et de satisfaire ses clients [Brandenburg 03].

L'approche processus est basée sur une analyse horizontale et transversale d'une organisation qui se différencie des approches traditionnelles hiérarchiques et verticales (Figure II.2).

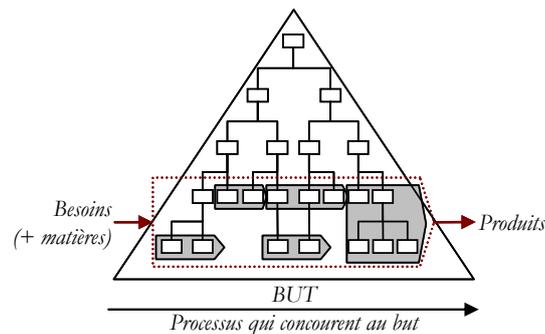


Figure II.2. Représentation transversale des processus

Selon [Mathieu 03], l'approche processus permet :

- de répondre aux besoins et attentes des clients en plaçant ceux-ci au cœur du fonctionnement de l'entreprise,
- de donner un sens au travail des personnes pour améliorer l'efficacité et l'efficience des processus sur lesquels ils agissent,
- de déterminer leurs missions et contributions dans l'obtention de la satisfaction des clients,
- d'optimiser l'obtention de résultats.

Cette approche de modélisation permet d'intégrer les besoins et attentes du client, selon un formalisme connu des entreprises afin d'avoir des développements compatibles en vue d'une future utilisation industrielle.

II.2.3 Cartographie des processus

La représentation processus d'une organisation est basée sur la cartographie de ses processus.

Un processus est défini comme "un enchaînement d'activités ou d'ensembles d'activités, alimentés par des entrées, disposant des ressources et ajoutant de la valeur par rapport aux entrées, afin de créer les sorties" [ISO 9001 00].

Les entrées d'un processus peuvent provenir de l'extérieur ou d'un autre processus (processus amont) ; il en est de même pour ses sorties qui vont vers l'extérieur ou vers un autre processus aval [ISO 9001 00].

REMARQUE. Une activité est une succession de tâches élémentaires [Mathieu 03] :

- accomplies par un individu,
- faisant appel à des ressources (matérielles, informatives, financières, humaines,...),
- permettant d'obtenir un résultat avec valeur ajoutée, c'est-à-dire un produit ou un service destiné à un client.

La cartographie est une représentation graphique qui permet de visualiser l'ensemble des processus identifiés et de suivre les besoins du client dans l'organisation ou dans l'entreprise. La cartographie des processus peut s'avérer être un outil d'aide à la décision nécessaire au service de direction, pour organiser et positionner les processus de l'entreprise.

C'est également un outil de communication efficace qui :

- en externe, permet de présenter aux clients et autres partenaires, le fonctionnement de l'entreprise,
- en interne, facilite le débat et les échanges entre acteurs, en permettant à chacun de mieux comprendre sa place et sa contribution afin de satisfaire, au final, le client.

Cette cartographie des processus peut être réalisée à différents niveaux, semblables à l'approche systémique. Nous aurons donc des macroprocessus à un niveau global, des processus élémentaires, des sous-processus, des activités ou encore des tâches à un niveau de détail opérationnel.

II.2.4 Modélisation processus de la maintenance

Nos travaux se concentrant sur la maintenance, nous avons appliqué ce cadre normatif à la maintenance en instanciant le modèle de processus global d'une organisation proposé par l'ISO 9001. Ce modèle associe une organisation à un processus comprenant :

- des flux entrants,
- des transformations de ces flux entrants en utilisant des moyens,
- des flux sortants résultant des transformations.

Dans le cas d'une organisation de maintenance, le modèle global est représenté sur le schéma de la Figure II.3.

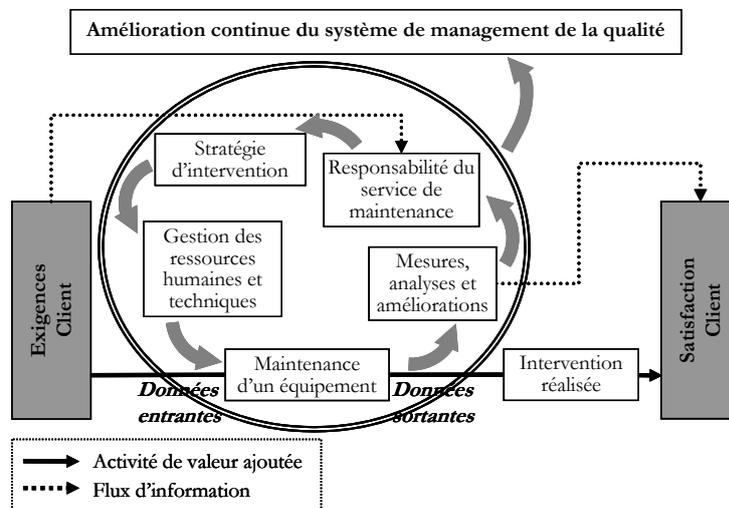


Figure II.3. Vision processus de la maintenance

Cette première modélisation globale peut être complétée par la distinction de trois types de processus élémentaires. Il s'agit des processus :

- de pilotage : gestion des autres processus en transformant des informations en directives,
- de réalisation : activités de transformation participant directement à la réalisation d'un produit ou d'un service pour un client,
- support : ressources et moyens nécessaires au déroulement de tous les autres processus.

La mise en évidence de ces trois types de processus pourra être réalisée à différents niveaux d'analyse. En maintenance, ces processus élémentaires peuvent être :

- pour le pilotage, le processus de management général du service maintenance,
- pour la réalisation, le processus d'intervention,
- pour les supports, les processus de gestion des ressources humaines et techniques, de l'information, de logistique, de contrôle, de gestion financière,...

Nous proposons sur la [Figure II.4](#) une représentation des processus intervenant en maintenance.

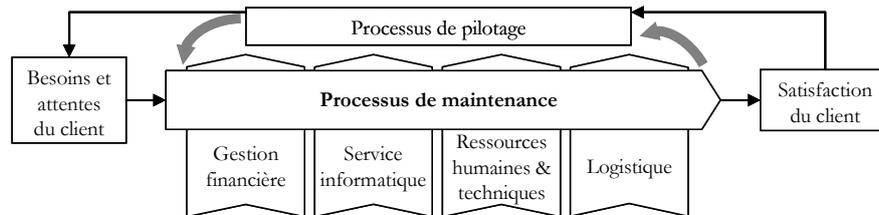


Figure II.4. Représentation des processus de maintenance selon la norme ISO 9001

Nous étudions le processus d'intervention de maintenance en le plaçant au centre de notre représentation processus comme processus de réalisation. Ce processus est conditionné par le client avec, en entrée, les besoins et les attentes du client envers le fonctionnement des équipements à maintenir, la disponibilité de ces équipements pour réaliser la fonction de production ou de service de l'entreprise. Le client figure encore en sortie du processus d'intervention de maintenance via son niveau de satisfaction sur l'atteinte des objectifs contenus dans l'expression des besoins. Le processus d'intervention transforme les besoins du client en satisfaction du client et les équipements à maintenir en équipements maintenus. Pour effectuer ces transformations, le processus d'intervention peut s'appuyer sur des processus support tels la logistique, les ressources humaines et techniques, le service informatique et la gestion financière. Enfin, le processus de maintenance est géré par un processus de pilotage.

Le cadre normatif ISO permet d'analyser les processus, leurs entrées / sorties et les transformations qu'ils réalisent par rapport aux préoccupations du client en gardant une organisation des processus centrée sur celui-ci.

Il est possible de détailler davantage les processus.

Une activité de maintenance est formée de plusieurs étapes, généralement successives, distinguées par les besoins nécessaires, les mécanismes engagés et les résultats produits. Cette décomposition a été abordée dans plusieurs travaux [Pérès 06], [Chelbi 06], [Lehtonen 05]. Les travaux de Pérès, par exemple, différencie six étapes qui seront encore distinguées selon la nature préventive ou curative de l'intervention (Figure II.5). L'étape "détection" correspond au début de l'intervention (alerte), déclenchée par la détection d'un événement : défaillance en cas d'intervention corrective ou donnée calendaire en cas d'intervention préventive. Les étapes "préparation" et "diagnostic" correspondent respectivement à la préparation de l'intervention (acheminement,...) et aux investigations qui conduisent à la caractérisation de l'évènement (nature de la défaillance et causes possibles en action curative,...). L'étape "logistique" rassemble l'ensemble des actions nécessaires au regroupement des diverses ressources nécessaires à l'intervention incluant la commande des pièces de rechange selon les

besoins, leur acheminement, les outillages nécessaires, l'attente de disponibilité des acteurs,... L'étape "action" concerne l'intervention de maintien ou la réparation proprement dite. L'étape "contrôle" concerne les tests de conformité de l'intervention et de vérification du fonctionnement de l'équipement, la remise en fonctionnement de l'équipement lorsque l'intervention est validée ; elle est souvent suivie du classement de l'intervention réalisée parmi les expériences réutilisables.

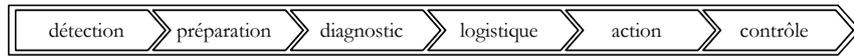


Figure II.5. Processus d'intervention de maintenance

Dans le premier chapitre, nous avons fait au paragraphe I.1.3.1.1 la distinction entre les ressources matérielles et immatérielles contribuant au processus d'intervention et celle de leur localisation géographique en local, auprès de l'équipement à maintenir, ou à distance, accessibles via le e-service (cf. Figure I.2).

Nous pouvons ainsi affiner la représentation du processus de réalisation des interventions de maintenance et de ses éléments support (Figure II.6).

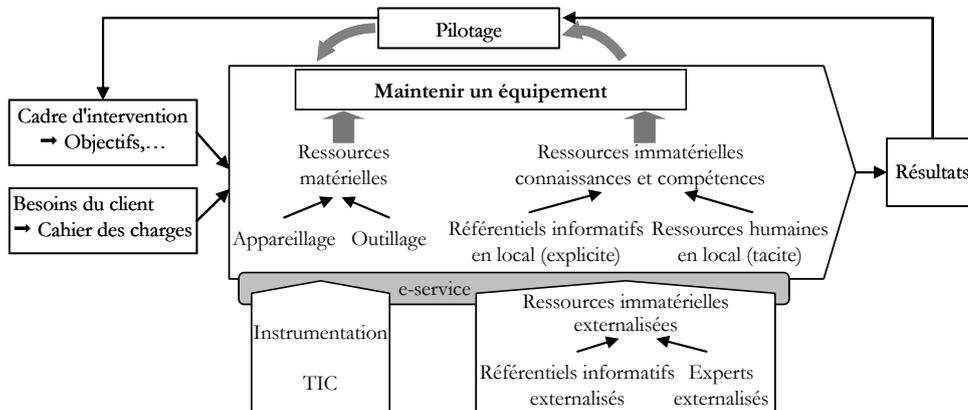


Figure II.6. Mise en évidence des processus clés intervenant en e-maintenance

Les ressources matérielles correspondent aux éléments physiques, de nature technique, utiles ou nécessaires aux processus d'intervention de maintenance : pièces de rechange, appareillages de mesure, de diagnostic, outillages permettant de monter ou démonter un équipement,... Les ressources humaines peuvent également leur être associées, l'acteur apparaissant alors comme un actionneur de ressources matérielles. Les ressources matérielles font partie du processus de réalisation puisqu'elles sont utilisées en local, auprès de l'équipement à maintenir.

Les ressources immatérielles sont de nature humaine ou informatique permettant de réaliser l'intervention (diagnostiquer la défaillance,...) : données, informations, connaissances, compétences, savoir-faire ou savoir-être. Nous définirons plus précisément ces ressources au chapitre III.

Les ressources immatérielles peuvent intervenir au niveau du processus de réalisation lorsqu'elles sont présentes auprès de l'équipement pour la réalisation de l'intervention ou au niveau du processus support lorsqu'elles sont consultées à distance.

L'intégration des TIC est représentée par un processus support : leur utilisation rend accessible en local des ressources externalisées.

Nous allons nous orienter dans nos travaux vers l'étude des ressources immatérielles, les TIC ayant des effets importants dans leur mise à disposition et leur accessibilité. Soulignons cependant que les

ressources matérielles peuvent également bénéficier des effets des TIC. Des travaux ont déjà été menés dans ce sens. Citons, par exemple, la gestion de pièces de rechange à distance [Kaffel 01] ou encore la conception de plateformes d'instrumentation de solutions de e-maintenance [Bangemann 06]. Compte tenu de ces travaux, nous nous consacrerons plutôt aux ressources immatérielles utilisées en e-maintenance.

Sur la Figure II.6, les interactions entre le processus de réalisation et les processus support sont matérialisées à l'aide d'une interface qui symbolise l'utilisation de e-service. Lorsqu'elles sont externalisées, les ressources immatérielles sont utilisées via cette interface de e-service.

II.3 MODÉLISATION OBJET DES ACTIVITÉS DE E-MAINTENANCE

Nous allons présenter, dans le cadre normatif que nous venons de définir, une modélisation objet des activités de maintenance. Nous allons préciser les éléments clés, notamment ceux support des activités de e-maintenance, influant sur leurs performances.

II.3.1 Principes de la modélisation objet

II.3.1.1 Présentation de l'approche objet

Initialement conçus pour réaliser des abstractions du monde réel, les langages objet permettent la modélisation statique et dynamique des constituants d'un système et de son environnement, à partir de modèles stables et réutilisables, avec une appropriation aisée des caractéristiques du système.

Le langage de modélisation UML (Unified Modeling Language) est un des principaux langages objet ([UML2 07], [Booch 00]), pouvant être associé à des langages de programmation comme Java, C#,...

Nous avons fait le choix d'utiliser le langage de modélisation UML afin de formaliser le problème étudié et de spécifier ses éléments clés. Nous souhaitons mettre à profit ses capacités de représentation graphique et de structuration afin d'identifier les composants clés de notre étude. Pour cela, nous commençons par définir les classes des composants intervenant dans les activités de e-maintenance. Nous utilisons ensuite ces classes et les objets, instances de ces classes, pour construire une modélisation à base de diagrammes statiques permettant d'avoir une représentation claire des situations étudiées et de diagrammes dynamiques permettant de modéliser des scénarios d'activités de e-maintenance.

II.3.1.2 Travaux existants réalisés avec la modélisation objet et UML

Nous examinons d'abord certains travaux existants où UML a été utilisé et évaluons leurs apports pour les comparer à nos attentes.

La littérature concernant les développements UML est assez dense. Les travaux utilisant UML appartiennent à différents courants de recherche (le langage UML est également utilisé en maintenance). Nous avons retenus certains travaux qui nous ont paru intéressants, dans l'environnement de notre problématique, certains pour spécifier des situations décisionnelles ou collaboratives, d'autres pour développer des outils collaboratifs ou d'aide à la décision.

Considérons d'abord des travaux ayant conduit à un développement logiciel, à partir de modélisation objet. Gomes et Rodriguez ont utilisé UML pour spécifier une architecture collaborative et la développer [Gomes 06], [Rodriguez 02]. Dans ses travaux, Le Bars s'appuie sur UML pour spécifier et

programmer un système multiagents permettant d'aider les décisions d'un collectif [Le Bars 03]. Dans un autre domaine, Perpen a conçu et développé une application orientée objet aidant à maîtriser le processus de coupe en usinage [Perpen 00].

Sans reproduire à notre niveau leur finalité applicative, ces travaux nous ont permis de prendre conscience des difficultés à formuler les enjeux décisionnels ou collaboratifs afin de les intégrer à un utilitaire.

D'autres travaux n'ont utilisé UML que pour spécifier une problématique, modéliser ou mieux comprendre un mécanisme, un problème,... Ainsi, Lardeur et Longueville se sont appuyés sur UML pour modéliser les mécanismes de décision et le processus décisionnel, afin d'avoir une vision claire et formalisée des enjeux en présence [Lardeur 04], [Longueville 03]. Les travaux de Laforcade ont le même objectif en modélisant des situations coopératives de résolution de conflit à partir de diagrammes UML de communication et de séquence [Laforcade 04]. Cho modélise aussi les étapes de la collaboration en chaîne logistique afin de mieux comprendre les mécanismes en présence à chaque étape d'une chaîne logistique [Cho 04].

Nous retrouvons ici nos préoccupations de modélisation. Cependant, si ces travaux modélisent bien les principales caractéristiques décisionnelles ou collaboratives, ils ne s'attachent pas à détailler leurs composantes. De plus, ils n'offrent qu'une vision partielle de situations de prise de décision ou de collaboration, sans modéliser leur environnement, les acteurs support,...

Concernant la maintenance, le langage UML est employé pour décrire des scénarios de négociation entre plusieurs acteurs (mainteneurs et experts) [Yu 03] ou les communications présentes au sein d'une architecture d'aide aux interventions [Hung 03]. En sûreté de fonctionnement, les travaux de Gouriveau sont basés sur une approche de modélisation objet pour formaliser les données manipulées en gestion des risques [Gouriveau 04]. UML a également été utilisé pour aider au développement de plateformes de e-maintenance, comme Proteus avec les travaux de [Bangemann 06], de [Tararykine 05] où les auteurs travaillent sur les flux d'information dans ces architectures ; les travaux de [St Voirin 06] où l'utilisation de systèmes multiagents pour modéliser ces plateformes est proposée.

Les modélisations UML en maintenance offrent une vision globale des situations considérées, proche de notre attente de représentation des situations de décisions collaboratives en maintenance, en présence d'outils issus des TIC, selon des approches distribuées ou à distance. Cependant, ces travaux ne matérialisent pas de manière explicite les besoins en ressources immatérielles requises par les activités de décision. La formalisation des activités de décision collaborative environnées des TIC, intégrant la prise en compte des ressources immatérielles requises et, pour nous, replacée dans un contexte de maintenance, reste nécessaire.

Des modèles formalisant les activités de e-maintenance ont également été établis dans le cadre de projets et ont conduit à l'établissement de standards de normalisation. Citons, par exemple, la norme ISO 62264 [ISO 62264] ou le projet américain MIMOSA (Machinery Information Management Open Systems Alliance) qui a conduit à la formalisation d'un ensemble de modèles via le CRIS (Common Relational Information Schema) [MIMOSA 08]. Les modèles que nous proposons dans la suite de ce paragraphe sont conformes à ces standards et en reprennent certains pour partie (modèles des acteurs ou équipements de la norme ISO 62264).

II.3.2 Application d'UML aux activités de e-maintenance

Les développements réalisés à l'aide d'UML sont décomposés en deux étapes. Nous proposons d'abord une identification de composants avec la définition de classes. Nous utilisons ensuite ces classes dans plusieurs diagrammes qui traduisent l'organisation, les relations entre les composants des activités de e-maintenance et le déroulement de scénarios d'intervention.

II.3.2.1 Identification de classes

Nous commençons par identifier les composants de base nécessaires au déroulement d'une activité de maintenance, en définissant des classes élémentaires. Nous intégrons ensuite la dimension TIC avec les potentialités offertes par les TIC pour faciliter ou permettre les relations entre classes.

II.3.2.1.1 Composants de base d'une activité de maintenance

Lorsque nous avons défini le cadre d'étude, nous avons indiqué que les activités de maintenance impliquaient plusieurs éléments qu'il fallait obligatoirement considérer pour permettre une description significative des situations à étudier :

- les équipements à maintenir, à l'origine de l'intervention,
- les appareillages et outillages : matériel technique pour la réalisation des interventions,
- les acteurs : ressources contribuant à la réalisation des interventions,
- les référentiels informatifs : ensemble de ressources immatérielles nécessaires à la réalisation des interventions.

Nous avons associé une classe UML (Figure II.7) à chacun de ces éléments.

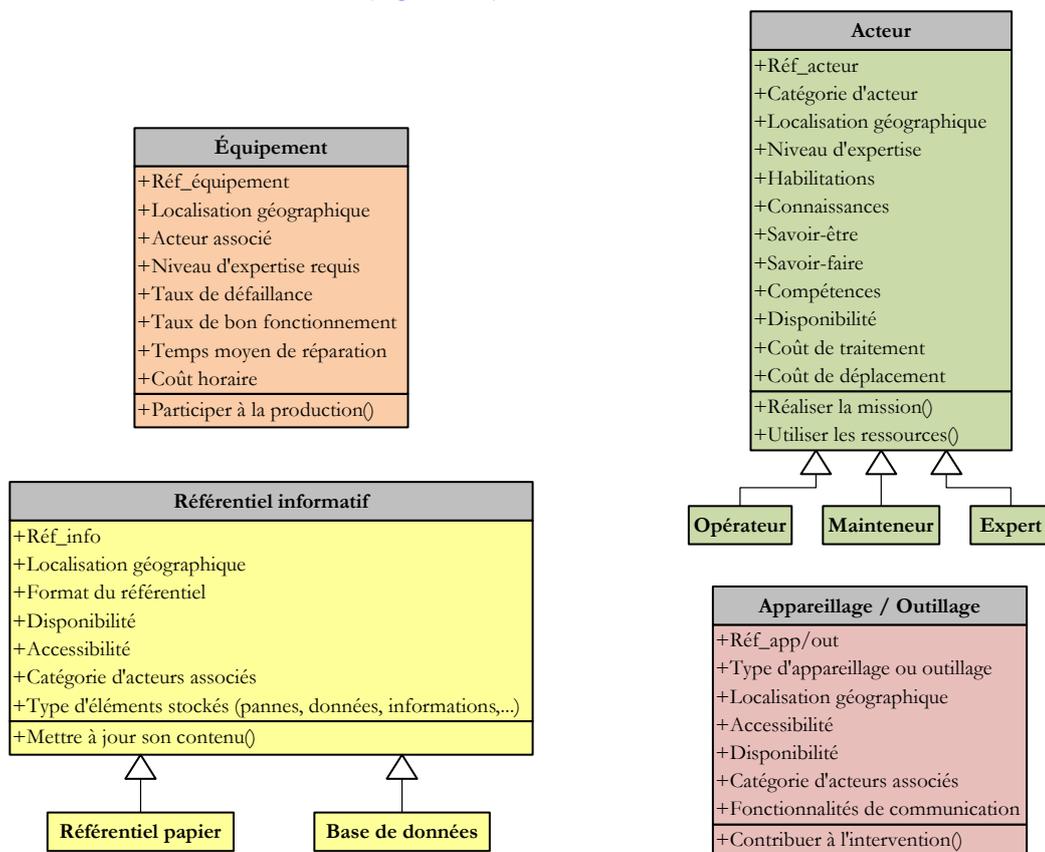


Figure II.7. Classes élémentaires des activités de maintenance

Chaque classe est définie à l'aide d'un ensemble d'attributs et de méthodes. Nous avons privilégié les caractéristiques étudiées dans nos travaux et affecté à chaque classe une référence unique permettant de l'identifier et de la considérer individuellement.

Les équipements à maintenir sont définis selon :

- leur localisation géographique : situation dans l'atelier et par rapport au centre de maintenance,
- l'acteur associé : opérateur travaillant habituellement sur l'équipement,
- le niveau d'expertise requis : niveau de complexité des activités couramment réalisées associé au niveau de maintenance (cf. niveaux de 1 à 5 définis par la norme AFNOR, au paragraphe [I.1.1.1.3](#)),
- le taux de défaillance : fréquence d'occurrence des défaillances,
- le taux de bon fonctionnement,
- le temps moyen de réparation,
- le coût horaire : coût de fonctionnement de l'équipement.

Dans le contexte de nos travaux, les équipements ont pour principale mission de participer aux activités de production en réalisant une fonction contribuant à l'activité de l'entreprise ; c'est ce que nous traduisons à l'aide de la méthode de la classe équipement.

Les acteurs sont spécifiés selon :

- leur catégorie : opérateur de production, mainteneur ou expert, selon leur niveau d'expertise,
- leur localisation géographique : en local auprès de l'équipement (opérateur, mainteneur) ou à distance (mainteneur, expert),
- le niveau d'expertise : associé à une catégorie d'acteur, selon les niveaux de maintenance (cf. paragraphe [I.1.1.1.3](#)),
- les habilitations : certifications officielles des aptitudes des acteurs,
- les ressources immatérielles nécessaires aux interventions : connaissances, savoir-faire, savoir-être et compétences, plus amplement définies au chapitre III,
- leur disponibilité : acteur disponible ou indisponible pour la réalisation de l'intervention,
- le coût horaire de réalisation des interventions de maintenance,
- le coût de déplacement si l'acteur n'est pas en local.

Nous avons défini deux méthodes pour la classe acteur : la réalisation de sa mission en rapport avec la réalisation des interventions de maintenance et l'utilisation de ressources nécessaires à la réalisation des interventions.

Dans une relation d'héritage, cette classe peut donner lieu à trois autres classes, selon les catégories d'acteurs intervenant en maintenance comme représenté sur la [Figure II.7](#). Les trois classes opérateur, mainteneur et expert héritent des attributs et méthodes de la classe acteur.

Les référentiels informatifs peuvent être caractérisés selon :

- leur localisation géographique,
- le format du référentiel : papier, informatique, ...,
- leur disponibilité : référentiel disponible ou pas si déjà consulté par un autre acteur,
- leur accessibilité : accessible ou pas selon leur localisation et les droits d'accès,
- la catégorie d'acteur associée : acteurs ayant les droits et les compétences pour consulter ce référentiel,

- le type d'éléments stockés : historiques de défaillances, manuel du fabricant, informations techniques,...

Nous avons spécifié une méthode pour les référentiels informatifs : assurer la mise à jour de son contenu afin d'avoir des éléments stockés actualisés.

Cette classe peut également être décomposée en deux classes, dans une relation d'héritage : les référentiels au format papier (manuels qualité, procédures, manuels des équipements,...) ou les référentiels informatiques (bases de données,...), comme modélisée sur la [Figure II.7](#).

Ces deux classes ont les mêmes attributs et méthodes que la classe parent référentiel informatif ; néanmoins, leur engagement est différent car les référentiels informatiques nécessitent l'utilisation des TIC pour être consultés à distance contrairement aux référentiels au format papier.

Les appareillages et outillages sont définis avec les caractéristiques suivantes :

- le type d'appareillage ou d'outillage (appareil de mesure, outil de démontage,...),
- leur localisation géographique,
- leur accessibilité : accessible ou non selon la localisation géographique,
- leur disponibilité : disponible ou indisponible,
- les fonctionnalités de communication : possibilités d'échange, de récupération de données à distance ou en direct,
- la catégorie d'acteur associée : acteurs ayant les compétences pour utiliser ces ressources matérielles.

Comme pour les référentiels informatifs, la méthode associée aux appareillages et outillages concerne leur utilisation dans la résolution des défaillances.

Nous complétons ces quatre éléments de base des activités de maintenance avec une classe modélisant les sollicitations d'intervention. Cette classe permet de modéliser l'élément déclencheur du processus de maintenance et, ainsi, de mieux appréhender les besoins et contraintes en présence. Une sollicitation d'intervention peut être associée à des interventions de maintenance préventive ou corrective.

Cette classe est présentée sur la [Figure II.8](#).

Sollicitation d'intervention
+Réf_int
+Niveau de complexité (de 1 à 5)
+Fréquence d'occurrence
+Poste d'intervention
+Utilisation de ressources
+Durée de traitement
+Coût de traitement

Figure II.8. Classe décrivant les sollicitations d'intervention de maintenance

La classe spécifiant les sollicitations d'intervention (générées suite à un évènement calendaire ou à une détection de défaillance ou de dysfonctionnement) est caractérisée selon :

- le niveau de complexité (cf. niveaux de 1 à 5 définis par la norme AFNOR, au paragraphe [I.1.1.1.3](#)),
- la fréquence d'apparition : fréquence d'occurrence des sollicitations de maintenance préventive ou corrective,
- le poste d'intervention : équipement associé à l'intervention,

- l'utilisation de ressources requises : appareillage, outillage, acteurs, procédures, bases de données, TIC,...
- la durée et le coût de traitement de l'intervention.

II.3.2.1.2 Classes TIC

Nous complétons les cinq classes permettant de représenter des activités de maintenance par deux autres classes : l'instrumentation TIC et le réseau, présentées sur la [Figure II.9](#).

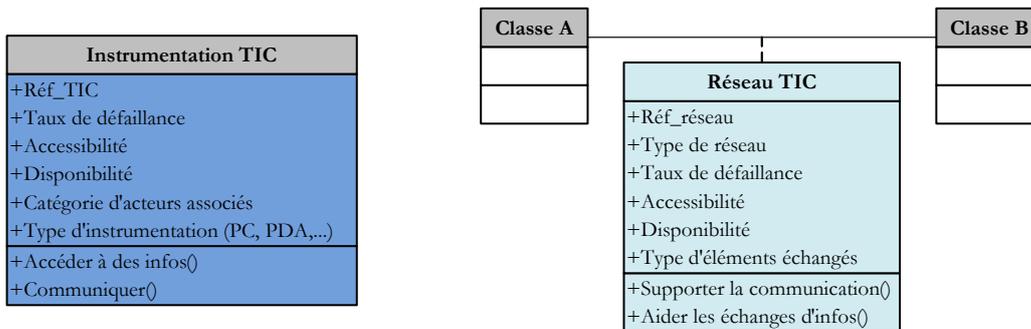


Figure II.9. Classes dédiées TIC

La classe instrumentation TIC correspond aux technologies individuelles que les acteurs utilisent pour communiquer, échanger ou accéder à des informations. Elles peuvent être caractérisées par :

- le taux de défaillance associé à l'instrumentation TIC,
- leur accessibilité : accessible ou non selon les droits d'accès,
- leur disponibilité : disponible ou indisponible,
- la catégorie d'acteur associée : acteurs ayant les compétences ou les droits d'utiliser ces instrumentations,
- le type d'instrumentation : ordinateur personnel, PDA (Personal Digital Assistant), tablette graphique,...

Dans les méthodes de la classe instrumentation, nous avons matérialisé les fonctionnalités offertes par ces outils technologiques, avec :

- l'accès à des informations diverses pouvant être distantes du lieu de consultation,
- la possibilité de communiquer et de contacter des acteurs distants.

La classe réseau TIC est une classe particulière qui matérialise l'association de deux autres classes. Cette association est une contrainte dont le fonctionnement est nécessaire pour que les deux classes associées puissent communiquer. Cette classe association est caractérisée par :

- le type de réseau : Internet, intranet,
- le taux de défaillance,
- la disponibilité : disponible ou non si déjà utilisé par une autre ressource,
- l'accessibilité : accessible ou non selon les droits d'accès,
- le type des éléments échangés : données, connaissances, historiques,...

La classe réseau étant le support aux échanges, les méthodes qui lui sont associées concernent la communication et les échanges d'information.

Lors de la représentation de situations ou de scénarios de e-maintenance, il est possible d'avoir plusieurs réseaux avec différents taux de défaillance ou un seul réseau commun à toute l'organisation modélisée.

REMARQUE. La classe instrumentation TIC peut elle aussi être une classe d'association lorsqu'elle permet à deux acteurs distants de collaborer. Ainsi, son bon fonctionnement est un prérequis nécessaire à la collaboration d'acteurs distants.

Avec ces classes, nous venons d'établir les composants élémentaires présents dans les situations de e-maintenance à étudier. La mise au point des classes nous a permis d'affiner la problématique étudiée en définissant clairement ces éléments. Dans les situations étudiées, nous avons plusieurs composants de type acteur, de type équipement, instrumentation TIC,...

La mise en situation de ces classes pour définir les activités de e-maintenance doit permettre de modéliser les enjeux collaboratifs qui sont matérialisés à l'aide des relations et des échanges possibles entre les classes.

II.3.2.2 Modélisations UML des activités de e-maintenance

L'utilisation des classes précédemment définies nous a conduits à établir certains diagrammes UML. Nous avons retenu, bien sûr, les diagrammes de classes et d'objets qui constituent la base d'UML et qui offrent une bonne représentativité des situations modélisées. Nous complétons la modélisation statique des diagrammes de classes et d'objets par les diagrammes de déploiement qui spécifient l'instrumentation physiquement en place.

Nous avons également choisi, pour le comportement dynamique, les diagrammes de cas d'utilisation qui permettent de définir des cas réels d'utilisation d'un système de e-maintenance et les diagrammes d'activités qui permettent de détailler les étapes d'un processus. À ces deux diagrammes, nous associons les diagrammes de séquence qui nous ont permis de modéliser les échanges présents lors d'activités de e-maintenance en construisant des scénarios de collaboration et les diagrammes de communication, affinant les rôles des objets.

II.3.2.2.1 Représentation statique des activités de e-maintenance

La première utilisation d'UML, une des plus couramment rencontrées, est la modélisation statique des classes constituant les activités de e-maintenance.

À l'aide de ces classes, nous avons réalisé un diagramme de classes, représenté sur la [Figure II.10](#).

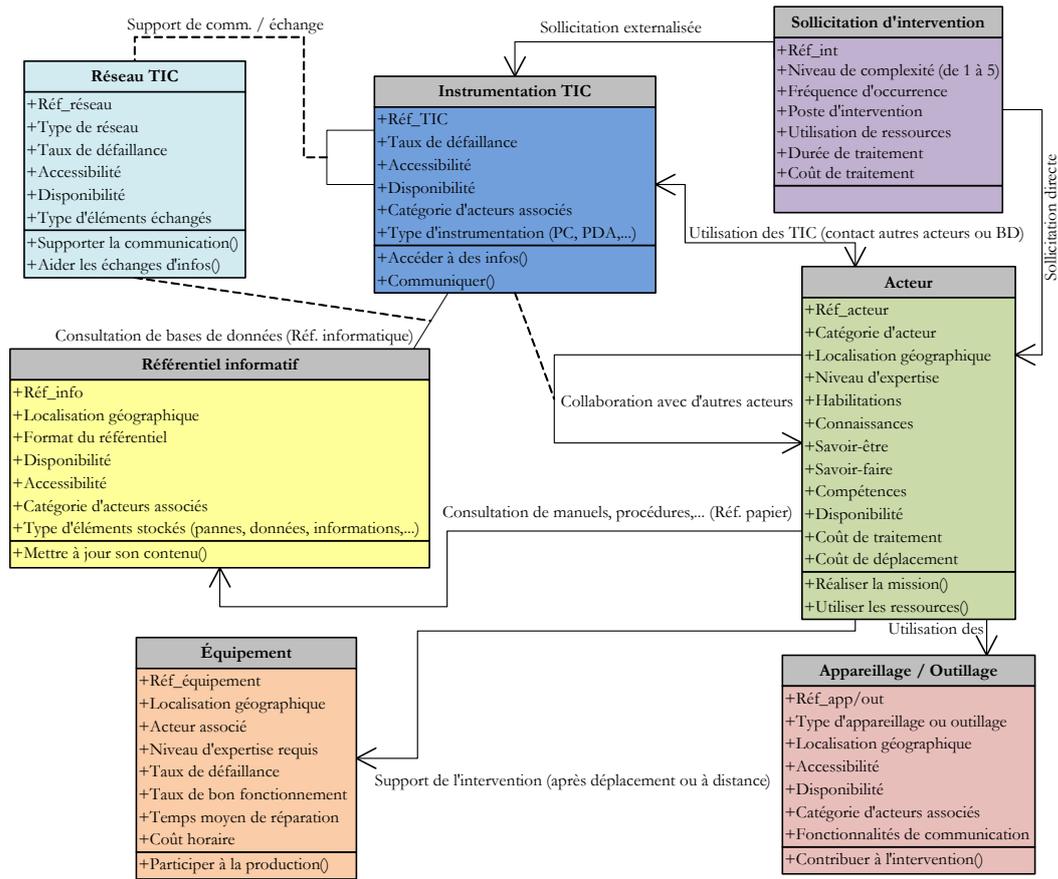


Figure II.10. Diagramme de classes

Sur ce diagramme, nous avons mis en évidence les principales relations entre les classes. Ces relations traduisent l'organisation des classes pour caractériser les activités de e-maintenance. Nous retrouvons la classe acteur qui peut utiliser des appareillages et outillages, des procédures ou manuels papier pour réaliser les interventions de maintenance sur des équipements. Ces interventions sont initiées par une sollicitation, suite à la détection d'une défaillance d'un équipement (action curative) ou à l'occurrence d'un évènement calendaire (action préventive). Les interventions peuvent être réalisées grâce aux apports des TIC : la consultation de bases de données via les instrumentations TIC ou la collaboration avec d'autres acteurs distants.

Ce diagramme de classes offre une description générale des activités de e-maintenance. Il est complété par un diagramme d'objets qui illustre une mise en situation plus concrète (Figure II.11).

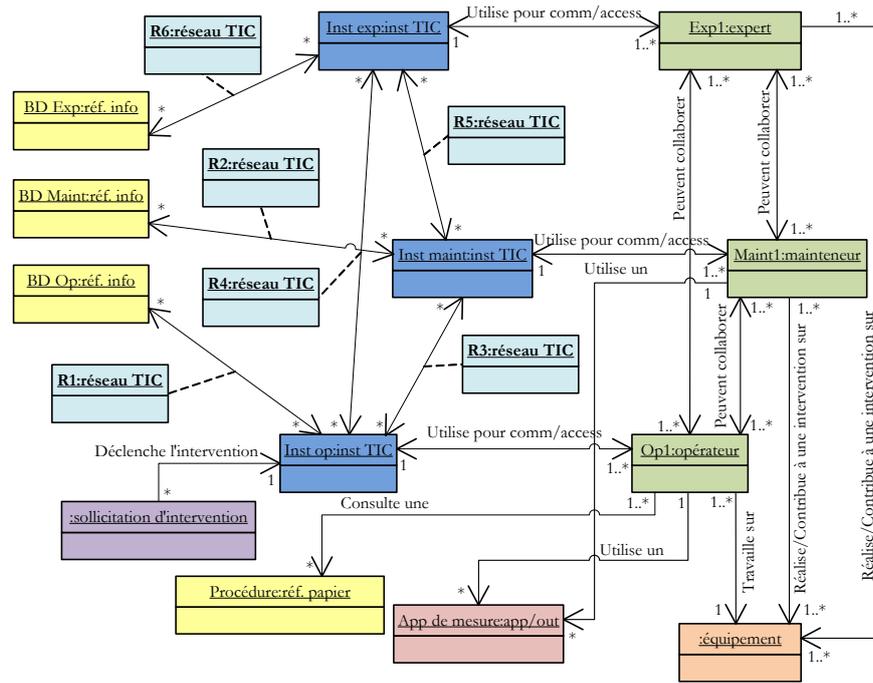


Figure II.11. Diagramme d'objets

Nous avons considéré trois catégories d'acteurs : opérateur, mainteneur et expert. Chaque acteur possède une instrumentation TIC lui permettant de communiquer avec les autres acteurs distants ou de consulter les bases de données. La sollicitation d'intervention marque le début de l'intervention provoquée par l'occurrence d'une défaillance ou d'un évènement calendaire.

Dans cet exemple, le paramétrage de la situation correspond à la présence en local de l'opérateur pendant la réalisation de l'intervention. Selon la complexité de l'intervention, l'opérateur pourra contacter le mainteneur ou encore l'expert, soit pour une aide à distance, soit pour leur déplacement sur site, auprès de l'équipement à maintenir. La collaboration entre les acteurs est également matérialisée puisque nous avons considéré que chaque acteur pouvait collaborer avec un autre acteur de manière explicite (en contact direct) ou à distance, via la classe instrumentation.

Les deux diagrammes que nous venons présenter ont permis de définir les relations entre les composants des activités de e-maintenance. Le diagramme de déploiement présenté sur la Figure II.12 apporte un autre éclairage avec la représentation de l'instrumentation et l'organisation physique de la e-maintenance.

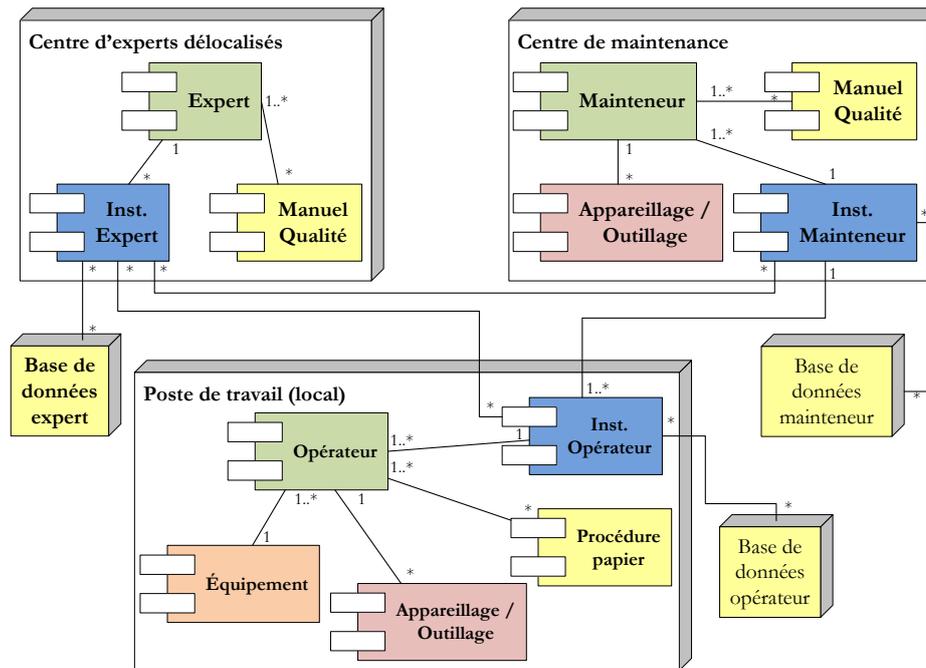


Figure II.12. Diagramme de déploiement

Dans cette illustration, nous avons défini trois sites physiques : un centre d'experts délocalisés, le centre de maintenance (non obligatoirement situé dans l'atelier de production) et le poste de travail associé à l'équipement à maintenir (référence du mode local). À chaque site, nous associons une catégorie d'acteur et la base de données qui lui correspond.

Chaque site (ou nœud dans le langage UML) est formé de composants. Par exemple, pour le site local, nous avons associé les composants opérateur, équipement à maintenir, appareillage / outillage, procédure papier et instrumentation permettant à l'opérateur de consulter sa base de données. Ce sont également les instrumentations qui permettent à deux sites distants de communiquer et d'échanger les données, informations ou connaissances aidant à la réalisation de l'intervention.

II.3.2.2 Représentation dynamique de la collaboration en e-maintenance

Pour évaluer l'impact des TIC, nous allons étudier les fonctionnalités associées aux objets des activités de e-maintenance avec le diagramme de cas d'utilisation. Nous allons également aborder l'évolution dynamique des relations entre les objets à l'aide des diagrammes d'activités, de séquence et de communication.

Considérons d'abord un diagramme de cas d'utilisation définissant les différents cas réels d'utilisation du système de e-maintenance, décrivant ainsi son fonctionnement. Sur la [Figure II.13](#), nous présentons ce diagramme en ayant décomposé le système de e-maintenance selon l'équipement, les appareillages / outillages, les procédures papier, les outils issus des TIC (instrumentation et réseau) et les bases de données.

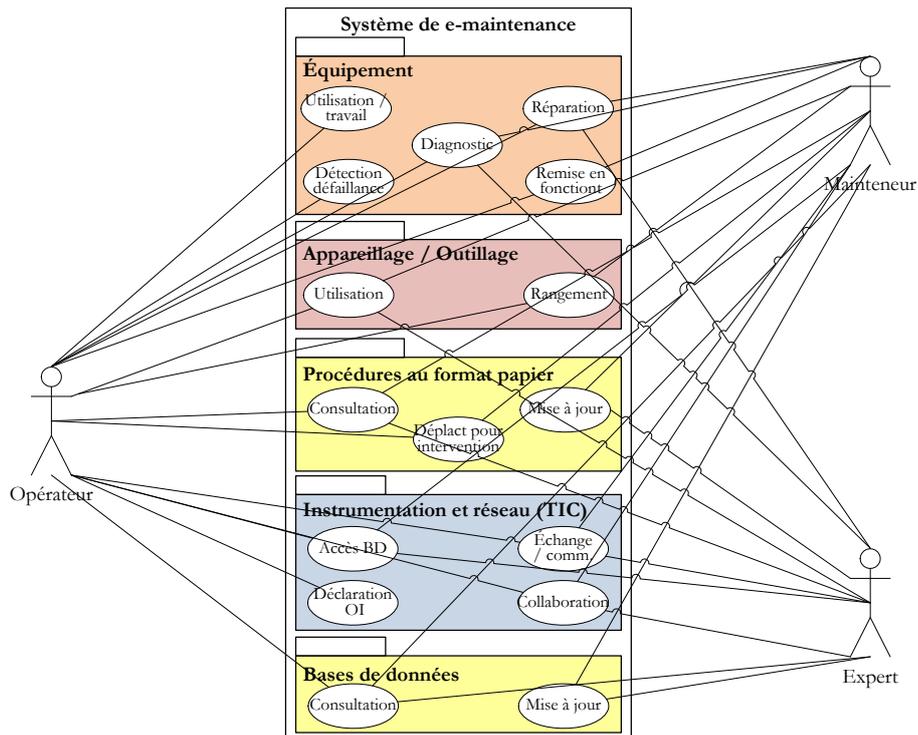


Figure II.13. Diagramme de cas d'utilisation

Ce diagramme permet de spécifier les fonctions associées à un système. Dans cet exemple, nous avons décomposé un système de e-maintenance selon les principales classes déjà définies : l'équipement à maintenir, les appareillages / outillages, les procédures au format papier, les outils issus des TIC (instrumentation et réseau) et les bases de données. Pour chaque classe, nous avons établi les fonctions qui peuvent être associées à un acteur. Ainsi, les trois acteurs intervenant en maintenance réalisent chacun certaines fonctions du système de e-maintenance, fonctions qui peuvent être distinctes. Par exemple, l'opérateur ne peut que consulter les bases de données alors que le mainteneur et l'expert peuvent également les mettre à jour. Par ailleurs, l'opérateur est le seul à utiliser l'équipement dans sa fonction principale de participation à la production de l'entreprise.

Considérons ensuite le diagramme d'activités, représenté sur la [Figure II.14](#), avec l'enchaînement des étapes nécessaires à l'établissement d'un diagnostic, dans le cas d'un apport de connaissances à partir d'une base de données.

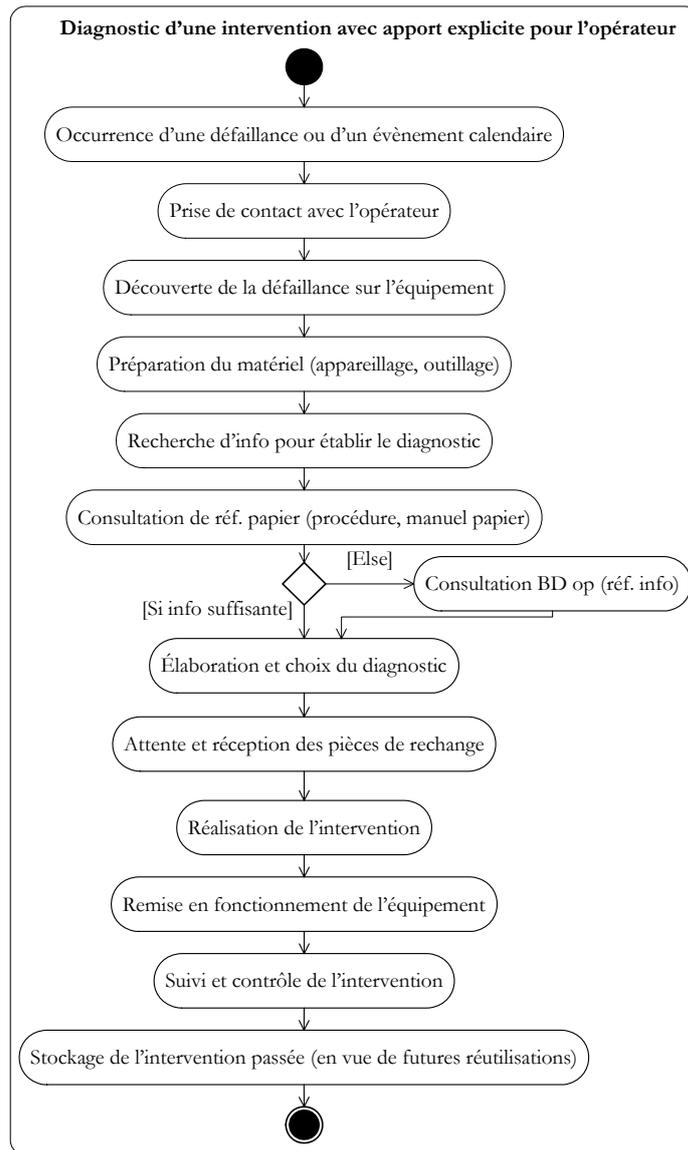


Figure II.14. Diagramme d'activités

Ce diagramme retrace le déroulement d'une activité de diagnostic. L'établissement d'un diagnostic étant une activité décisionnelle, nous retrouvons les étapes d'un processus décisionnel, comme celui défini par Simon et présenté au paragraphe 1.3.1.2 (recherche d'information sur la défaillance, élaboration de diagnostics possibles, établissement du diagnostic à effectuer et contrôle de l'intervention réalisée).

Pour représenter le déroulement dynamique d'un scénario d'intervention, nous proposons un diagramme de séquence modélisant le traitement d'une sollicitation, sans intégrer les fonctionnalités offertes par les TIC (Figure II.15).

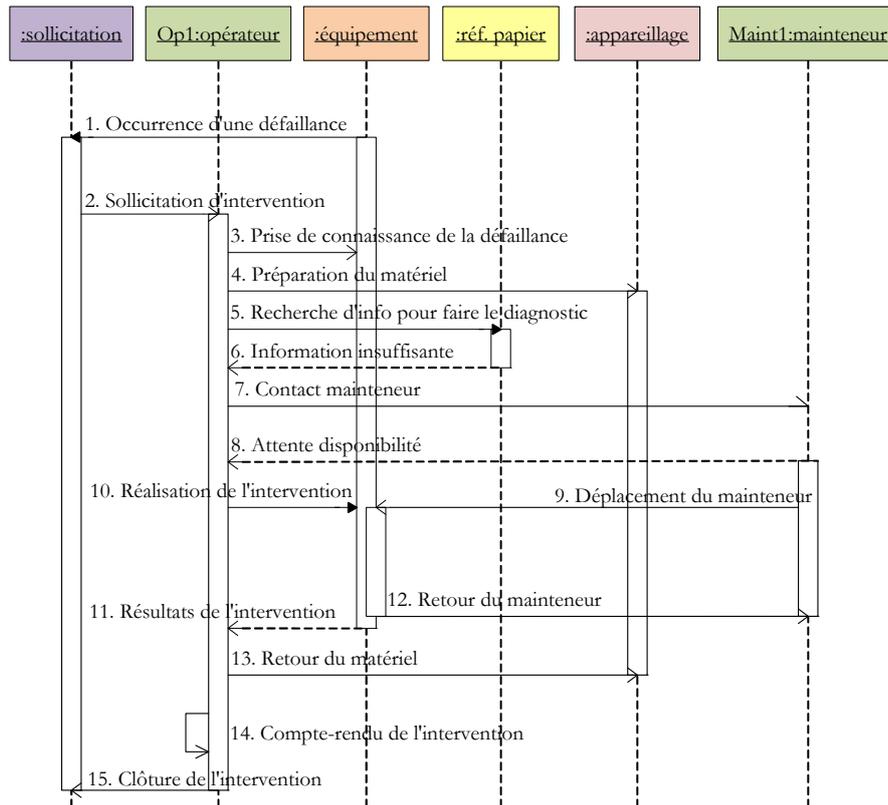


Figure II.15. Diagramme de séquence sans e-service

Ce diagramme traduit le déroulement d'une intervention nécessitant un mainteneur (par exemple, une intervention avec un niveau de maintenance d'ordre 3).

L'opérateur qui travaille habituellement sur l'équipement à maintenir est le premier acteur contacté suite à la détection de la défaillance (1) et à la génération d'une sollicitation (2). Il prend connaissance de la défaillance auprès de l'équipement défaillant (3). Il prépare ensuite le matériel nécessaire (qui pourra être complété au cours de l'intervention) à la réalisation de l'intervention (4) ; il peut s'agir au départ uniquement des moyens nécessaires au démontage pour permettre les investigations. Suite aux premiers constats, l'opérateur consulte la documentation papier (procédures, manuels qualité, documentation constructeur sur l'équipement,...) afin d'établir le diagnostic de la défaillance (5). Il constate que les documents à sa disposition ne sont pas suffisants pour diagnostiquer cette défaillance (6). L'opérateur prend alors contact avec un acteur plus compétent que lui, le mainteneur (7). Le mainteneur n'étant pas disponible, l'opérateur doit attendre qu'il soit disponible et qu'il vienne auprès de l'équipement pour l'aider (8). Quand il est disponible (9), le mainteneur se déplace auprès de l'équipement à maintenir (et de l'opérateur) afin de réaliser l'intervention (10). Lorsque l'intervention est terminée, l'opérateur sauvegarde les résultats de l'intervention, son déroulement, les éventuels imprévus,... (11). Il range le matériel utilisé (13) après le départ du mainteneur (12). L'opérateur termine l'intervention en réalisant le compte-rendu (14) et la clôture de l'intervention (15).

Dans ce scénario, l'opérateur n'avait pas le niveau de connaissances suffisant pour réaliser seul l'intervention et il a dû faire appel au mainteneur. Ne pouvant aider l'opérateur à distance, le mainteneur a été obligé de se déplacer, ce qui a entraîné un certain retard provoqué par son éloignement géographique.

Ces séquences s'inscrivent évidemment dans les six étapes du processus d'intervention de maintenance que nous avons présentées sur la [Figure II.5](#).

Considérons maintenant la même situation de traitement d'une sollicitation avec les fonctionnalités supplémentaires offertes par le e-service (instrumentation TIC et réseau²). Nous proposons le diagramme de séquence représenté sur la [Figure II.16](#).

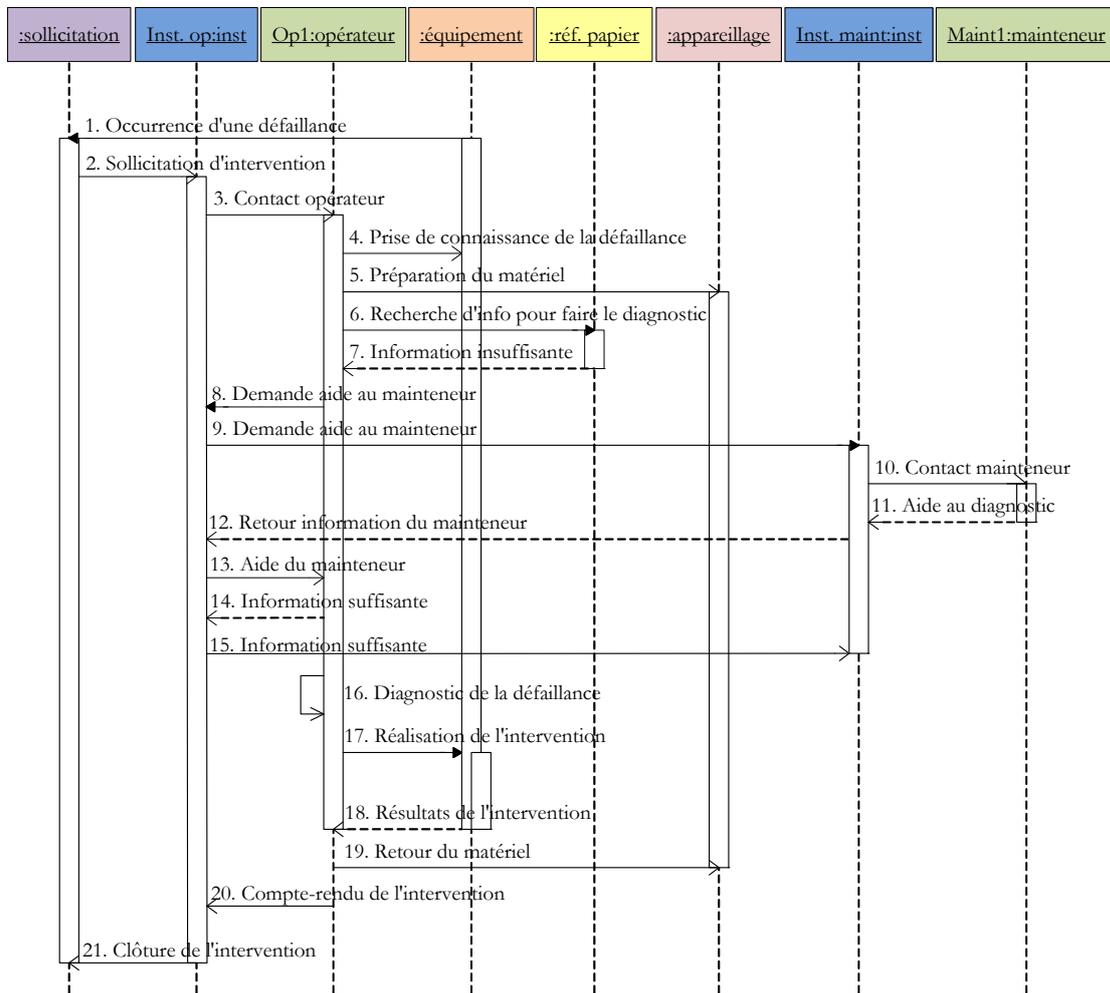


Figure II.16. Diagramme de séquence avec e-service

Ce diagramme traduit le traitement d'une intervention ayant le même niveau de complexité que le premier scénario (cf. [Figure II.15](#)), avec les apports du e-service (instrumentation TIC, échanges à distance,...). Ainsi, l'aide du mainteneur (11) et l'apport de ses connaissances (12) pour l'établissement du diagnostic peuvent être réalisés à distance via les TIC, contrairement au scénario de la [Figure II.15](#) où le mainteneur doit se déplacer. L'opérateur peut effectuer le diagnostic (16) avec les connaissances du mainteneur externalisé (13). Comme dans le scénario sans e-service, l'opérateur réalise l'intervention (17) et la remise en fonctionnement de l'équipement (18) mais, ici, il effectue seul ces tâches ; un seul acteur est mobilisé pour l'intervention. L'opérateur procède au rangement du matériel utilisé (19), sauvegarde le compte-rendu de l'intervention via son instrumentation en vue d'une réutilisation future dans des contextes similaires (20) et clôture la sollicitation (21).

² À noter que le réseau n'est pas représenté dans le diagramme de séquence pour ne pas alourdir la modélisation. Néanmoins, dans cet exemple, le réseau est nécessaire entre les instrumentations opérateur et mainteneur.

Les possibilités offertes par le e-service conduisent à plusieurs évolutions du traitement de l'intervention :

- le mainteneur n'est plus obligé de se déplacer,
- le non déplacement réduit la durée d'intervention (mais pas le nombre d'échanges qui est de 20 avec e-service et seulement de 16 sans e-service),
- une certaine optimisation du temps de travail des acteurs (pas de perte de temps en déplacement) et de leur disponibilité (les acteurs sont plus disponibles) avec une minimisation des acteurs engagés.

Les TIC permettent également d'accéder à des bases de données (distantes). Nous ne les avons pas intégrées dans cet exemple mais, bien sûr, leur consultation offre des possibilités supplémentaires. Les bases de données et les apports des acteurs distants permettent d'augmenter les ressources accessibles en local, auprès de l'équipement à maintenir. Cette plus grande capacité de traitement en local influence la réalisation des interventions et leur qualité.

Pour illustrer les apports de connaissances explicites des bases de données, nous avons construit un diagramme de communication présenté sur la Figure II.17. Le diagramme de communication offre, comme le diagramme de séquence, la possibilité de représenter des scénarios. Cependant, alors que ce dernier permet une répartition temporelle des échanges, le diagramme de communication reste basé sur une répartition spatiale des objets.

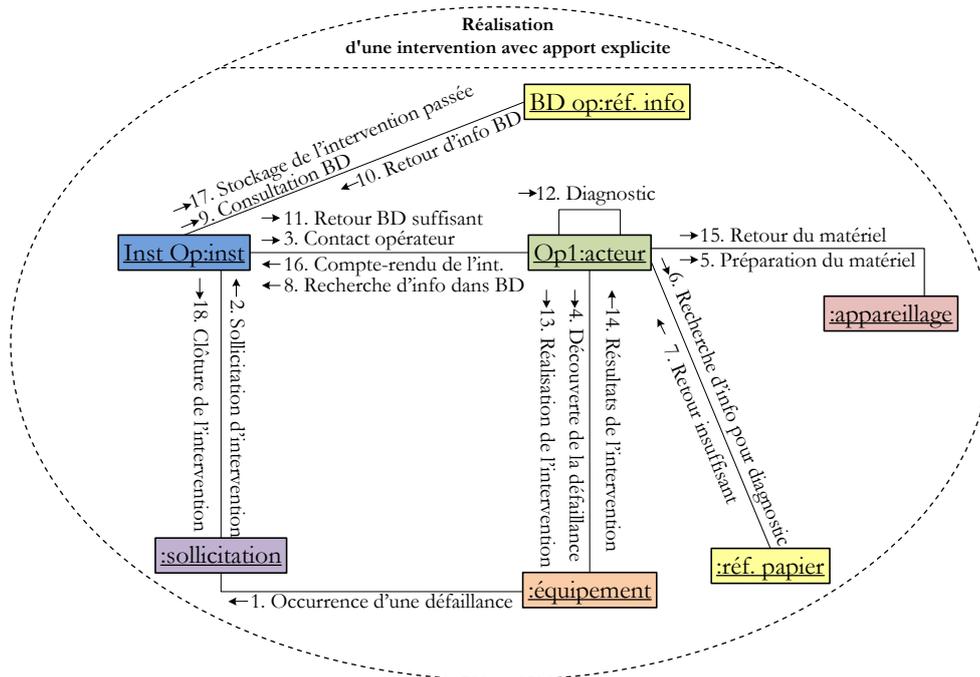


Figure II.17. Diagramme de communication

Dans l'illustration proposée, nous avons représenté le déroulement d'une intervention nécessitant un apport de connaissance explicite (issue d'une base de données). Comme dans les deux précédents scénarios décrits par les diagrammes de séquence, l'opérateur qui travaille habituellement sur l'équipement à maintenir est le premier acteur contacté (3) suite à l'occurrence d'une défaillance (1) et la génération d'une sollicitation d'intervention via son instrumentation (2).

L'opérateur prend connaissance de la défaillance (4) et prépare le matériel nécessaire (5). Il consulte les manuels et procédures papier à sa disposition pouvant l'aider à établir le diagnostic (6).

Les informations contenues dans ces référentiels papier ne sont pas suffisantes (7) ; l'opérateur doit donc rechercher une aide supplémentaire via son instrumentation (8) en consultant une base de données (10). Ce référentiel informatique contient l'aide suffisante (11) pour assister l'opérateur dans sa réalisation du diagnostic (12).

L'opérateur peut désormais réaliser l'intervention (13), la terminer (14) et ranger le matériel (15). L'opérateur effectue le compte-rendu de l'intervention (16) qui sera stocké dans la base de données (17) et clôture la sollicitation (18).

Au-delà de la représentation spatiale des messages échangés, ce diagramme permet de matérialiser les rôles des objets qui se traduisent, le plus souvent par leur classe (par exemple, l'objet opérateur a le rôle d'un acteur).

L'utilisation du langage de modélisation UML a permis de spécifier les composants des activités de e-maintenance et leurs organisations physiques et relationnelles. Les modélisations que nous venons de présenter avec UML nous ont permis de matérialiser les potentialités offertes par les TIC en ce qui concerne les activités de maintenance. Nous avons également illustré le rôle important des ressources matérielles et immatérielles nécessaires aux activités de maintenance. Le couplage entre TIC et ressources met en évidence l'importance des ressources immatérielles (définies plus précisément au chapitre III) qui constituent un enjeu majeur des activités de e-maintenance et que nous plaçons au centre de nos travaux.

Les deux types de modélisation UML (statique et dynamique) nous ont permis de représenter les activités de e-maintenance :

- en modélisation statique :
 - . diagramme de classes et son instanciation en diagrammes d'objets : modélisation des relations statiques et définition des composants physiques intervenant en e-maintenance,
 - . diagramme de déploiement : spécification de l'instrumentation physique du système supportant les activités de e-maintenance,
- en modélisation dynamique :
 - . diagramme de cas d'utilisation : définition des cas réels d'utilisation du système de e-maintenance,
 - . diagramme d'activités : modélisation détaillée du processus de diagnostic et des étapes qui le composent,
 - . diagramme de séquence : déroulement de scénarios d'intervention de e-maintenance, selon une représentation temporelle des échanges,
 - . diagramme de communication : déroulement de scénarios de e-maintenance, selon une représentation spatiale des échanges entre objets.

Nous prolongerons ces aspects modélisation dans le chapitre III en considérant la modélisation des processus décisionnels suivant le formalisme GRAI afin d'étudier l'influence de la collaboration sur ces processus.

II.4 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES ACTIVITÉS DE E-MAINTENANCE

La formalisation du cadre d'étude des activités de e-maintenance et de la problématique de décision collaborative aidée des TIC nous a permis de modéliser des scénarios. Suite à cette première étape de formalisation, nous proposons une analyse des performances afin d'évaluer les apports des TIC sur les activités de décision collaborative en maintenance. Cette analyse a pour objectif de mettre en évidence les leviers de performance, pour ensuite mettre en place des indicateurs de performance associés. Pour cela, nous prenons appui sur la modélisation objet dans le cadre normalisé des processus.

Nous nous intéressons à la performance des activités de maintenance, dans l'environnement des TIC. Notre approche peut être décomposée en deux points :

- identification de groupes d'indicateurs de performance,
- formulation détaillée d'indicateurs.

La méthode ECOGRAI a constitué une évolution importante de la méthode GRAI (qui sera rappelée au paragraphe III.1.2). Elle permet de définir des indicateurs de performance à partir de la modélisation classique de GRAI. La méthode ECOGRAI permet de concevoir et d'implanter des Systèmes d'Indicateurs de Performance (SIP) pour les entreprises [Bitton 90]. La conception des indicateurs peut être résumée en trois étapes : identification des objectifs des décideurs, des variables de décision et des indicateurs de performance.

Contrairement à certaines méthodes de définition d'indicateurs de performance [Cérutti 92], ECOGRAI s'appuie sur les variables de décision pour définir des indicateurs cohérents.

Nous allons mener une approche semblable à la méthode ECOGRAI puisque nous allons nous appuyer sur des variables de décision pour spécifier des indicateurs de performance. Néanmoins, nous n'allons pas adopter l'intégralité de cette méthode car les décideurs de maintenance auxquels nous nous intéressons ont des missions de nature diverses et variées ; il nous est donc difficile de partir de leurs objectifs pour formuler des variables de décision et, ensuite, des indicateurs de performance. Nous allons ainsi évaluer les ressources immatérielles et l'influence des TIC sur la mise à disposition de ressources immatérielles externalisées.

Nous reprenons le cadre normalisé des processus présenté au paragraphe II.2.4 (Figure II.6). Nous considérons une intervention de maintenance supportée par les TIC. L'évaluation de cette intervention nécessite la mise en place d'indicateurs permettant de mesurer les performances des prises de décision en e-maintenance et l'utilisation des ressources requises [Berrab 02].

Sur cette Figure II.6, nous avons distingué pour l'activité "Maintenir un équipement" les ressources :

- matérielles locales (auprès de l'équipement à maintenir),
- immatérielles locales et externalisées à l'aide des processus support.

À l'aide de l'interface du e-service, l'intervention peut bénéficier des apports de deux éléments support :

- l'instrumentation TIC,
- les ressources immatérielles externalisées [Berger 00].

La sortie du processus de maintenance est constituée du résultat de l'intervention qui traduit les performances du déroulement de l'activité de maintenance et de la remise en fonctionnement de l'équipement maintenu.

II.4.1 Identification de groupes d'indicateurs de performance

À partir de la représentation de la Figure II.6, nous avons identifié plusieurs types de performance permettant d'évaluer un processus de maintenance (Figure II.18), correspondant aux catégories suivantes :

- P_{DE} : performance requise dans les données d'entrée constituées par le cahier des charges défini par le client,
- P_{PI} : performance du pilotage de l'activité de maintenance,
- P_{PR} : performance du processus de réalisation : intervenir sur un équipement,
- P_{DS} : performance des données de sortie du processus de réalisation constituées des résultats de ce processus,
- P_{INT} : performance de l'utilisation de l'interface et des processus support aidant au déroulement du processus de réalisation.

Nous pouvons également décomposer la performance du processus de réalisation (P_{PR}) en :

- P_{RMat} : performance des ressources matérielles présentes en local,
- P_{RLocal} : performance des ressources immatérielles présentes en local.

De même, la performance des processus support (P_{INT}) utilisés via l'interface du e-service peut être décomposée en :

- P_{TIC} : performance du support TIC,
- P_{RExt} : performance des ressources immatérielles externalisées.

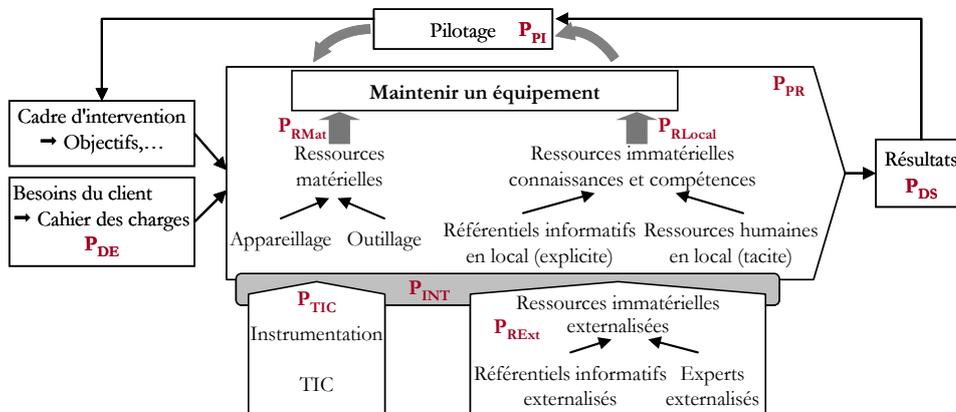


Figure II.18. Identification de groupes de performance

II.4.2 Indicateurs de performance

Après avoir identifié les principales catégories d'indicateurs de performance nécessaires, nous avons défini pour chacune les caractéristiques correspondantes et dégagé les indicateurs qui paraissent les plus pertinents. Pour cela, nous avons repris la modélisation objet établie avec les diagrammes UML. Les attributs définis pour chaque classe, l'organisation physique des composants des activités de maintenance et les relations entre objets nous ont servi de base pour spécifier les indicateurs de chaque groupe de performance.

Nous présentons ici les indicateurs de chaque catégorie de performance (résultats présentés dans [Garcia 07]) :

- le pilotage du processus de maintenance (P_{PI}) (Tableau II.2),
- les données d'entrée (P_{DE}) (Tableau II.3),
- les données de sortie (P_{DS}) (Tableau II.4),
- les ressources matérielles (P_{RMat}) (Tableau II.5),
- les ressources immatérielles, tant locales qu'externalisées (P_{RExt} et P_{RLocal}), qui sont spécifiées dans une même grille à la différence de la localisation géographique et du recours aux TIC pour les ressources immatérielles externalisées (Tableau II.6),
- le support TIC (P_{TIC}) (Tableau II.7).

REMARQUE. Les performances P_{RLocal} et P_{RMat} spécifient les performances du processus de réalisation (P_{PR}). De même, les performances liées à l'interface (P_{INT}) entre le local et l'externalisé sont définies avec P_{RExt} et P_{TIC} .

<i>Composantes</i>	<i>Caractéristiques ou leviers d'action</i>	<i>Indicateurs</i>
Besoins, cadre d'intervention	contraintes et objectifs de la mission variables de décision ³ domaine d'action	contraintes de durée, coût et moyens engagés profil du mainteneur niveau d'expertise requis taux de service des équipements
Résultats du processus de réalisation	comparaison résultats obtenus / attendus	durée, coût de l'intervention taux d'engagement des ressources indicateurs FMDS de l'équipement

Tableau II.2. Indicateurs de performance P_{PI} du pilotage

Nous ne détaillons pas davantage les indicateurs de pilotage qui sortent du cadre de nos travaux ; soulignons seulement que ces indicateurs concernent essentiellement le respect de la mission que le service de maintenance doit réaliser et la vérification des résultats obtenus par rapport aux résultats souhaités.

<i>Composantes</i>	<i>Caractéristiques ou leviers d'action</i>	<i>Indicateurs⁴</i>
Données d'entrée	cahier des charges - exigences client	fiabilité de l'intervention contraintes de déroulement du processus de réalisation

Tableau II.3. Indicateurs de performance P_{DE} des données d'entrée

Comme pour les indicateurs de pilotage, les données d'entrée ne sont pas intégrées à nos travaux. Cependant, nous allons veiller à respecter les attentes client concernant la réussite des interventions, même si nous ne les détaillons pas davantage.

³ Une variable de décision (ou variable d'action) est un facteur sur lequel il est possible d'agir pour faire évoluer tout ou partie d'un système afin d'en améliorer la performance [Berchet 00].

⁴ Les indicateurs spécifiés dans le cahier des charges sont conjoncturels, spécifiques aux situations considérées et ne peuvent donc pas être inventoriés ici. Nous ne donnons que des critères génériques.

<i>Composantes</i>	<i>Caractéristiques ou leviers d'action</i>	<i>Indicateurs de performance</i>
Résultat de l'intervention sur l'équipement	type d'équipement type de maintenance	coût et durée de l'intervention indicateurs classiques FMDS : taux de défaillance MTBF (Mean Time Between Failure) MTTR (Mean Time To Repair),...

Tableau II.4. Indicateurs de performance P_{Ds} des données de sortie

Les données de sortie du processus d'intervention de maintenance vont principalement concerner la réalisation de l'intervention dans son ensemble et son résultat avec les indicateurs classiques de coût et de durée ainsi que les indicateurs usuels FMDS (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité) de sûreté de fonctionnement.

<i>Composantes</i>	<i>Caractéristiques ou leviers d'action</i>	<i>Indicateurs</i>
Ressources matérielles	outillage (montage, démontage,...) appareillage (de mesure, de diagnostic,...)	taux d'engagement spectre d'utilisation niveau d'expertise requis disponibilité

Tableau II.5. Indicateurs de performance P_{RMat} des ressources matérielles

Les ressources matérielles ne sont intégrées à nos travaux que pour leur contribution à la réalisation des interventions de maintenance. Nous évaluons seulement leur taux d'engagement et leur disponibilité lorsqu'elles interviennent en support des activités de maintenance.

<i>Composantes</i>	<i>Caractéristiques ou leviers d'action</i>	<i>Indicateurs de performance</i>
Ressources immatérielles tacites	cadre de décision des acteurs : - nature (expériences, connaissances, informations,...) - profil utilisateur - outils - habilitation - niveau d'expertise - localisation	satisfaction des acteurs disponibilité des acteurs taux d'engagement taux d'externalisation temps de réponse fiabilité de la réponse niveau de connaissances / compétences ratio "connaissance requise / connaissance disponible"
Ressources immatérielles explicites	référentiel informatif : - nature (historique, expérience,...) - formalisme employé - localisation	taux d'utilisation taux d'externalisation niveau d'expertise requis temps de réponse fiabilité de la réponse

Tableau II.6. Indicateurs de performance des ressources immatérielles (P_{RLocal} et P_{RExt})

Les ressources immatérielles peuvent être présentes en local (intégrées au processus de réalisation) ou externalisées via l'interface et les TIC ; elles sont également utilisées sous la forme tacite (détenues par les acteurs) ou explicite (stockées dans des bases de données ou référentiels au format papier).

Les ressources tacites dépendent principalement des acteurs qui les détiennent et de leur disponibilité. D'autres caractéristiques comme la fiabilité de la réponse, le temps de réponse (d'un acteur ou d'une base de données), le taux d'utilisation pour la consultation des bases de données,... permettent également d'évaluer les performances des ressources immatérielles.

Les ressources externalisées, tacites ou explicites, seront caractérisées par le taux d'externalisation qui permet de quantifier la part délocalisée des ressources immatérielles par rapport à l'ensemble des ressources immatérielles considérées.

<i>Composantes</i>	<i>Caractéristiques ou leviers d'action</i>	<i>Indicateurs de performance</i>
Instrumentation TIC	type d'instrumentation niveau d'instrumentation infos collectées accessibilité niveau d'expertise	taux d'échec droits d'accès sécurité et mode de codage vitesse et capacité des échanges niveau d'expertise requis
Réseau	type de réseau droits d'accès sécurité et protection des échanges format d'échange nature des infos échangées	fiabilité disponibilité taux d'engagement coût, durée

Tableau II.7. Indicateurs de performance du support TIC (P_{TIC})

Les TIC sont composées de l'instrumentation TIC (émetteur / récepteur d'un échange ou d'une collaboration) et du réseau (vecteur supportant l'échange ou la collaboration à distance entre émetteur et récepteur) mais il leur correspond une évaluation globale car leur utilisation ne peut être dissociée. Les TIC peuvent être évaluées par leur fiabilité, leur disponibilité, la vitesse ou la capacité d'échange,...

Les indicateurs de performance du type P_{DS} permettent de construire une situation de valeurs de référence prises hors solutions TIC afin d'estimer les effets tant positifs que négatifs induits par l'utilisation des TIC. Le suivi de leur évolution lors d'une instanciation de solutions TIC permet de guider la conduite de celle-ci.

Les indicateurs de performance des ressources immatérielles (P_{RExt} et P_{RLocal}) permettent d'évaluer les apports de ces ressources dans la réalisation des activités de maintenance. Ces indicateurs concernent aussi bien les acteurs et leurs connaissances et compétences tacites que les référentiels informatiques et les ressources explicites qu'ils contiennent.

Les indicateurs de performance de l'interface P_{INT} sont directement liés à la performance du processus support TIC. Ces indicateurs concernent l'utilisation des TIC et leur intégration aux activités de maintenance avec, par exemple, la compatibilité d'échange entre acteurs ou référentiels informatiques, le niveau de compétences nécessaire à l'emploi des TIC, leur taux d'échec,...

L'ensemble de ces indicateurs permet d'établir un vecteur d'état descriptif :

- d'une situation (volume d'informations rapportées, fréquence de renouvellement,...),
- de la traçabilité d'une information renseignant sur son actualité, sa pérennité ou sa date de péremption,
- d'une signature moyenne de traitement d'intervention du service de maintenance.

Considérant les évolutions de ces indicateurs, nous avons analysé la variabilité des résultats de sortie en étudiant leur possible combinaison dans des scénarios de e-maintenance. Nous avons recherché les éléments influant sur le déroulement des scénarios et les éléments critiques pouvant faire échouer les activités de e-maintenance.

Nous avons constaté que la disponibilité et le taux d'échec du support TIC et la répartition des ressources immatérielles (essentiellement des connaissances) entre le mode local et le mode externalisé

sont les deux facteurs qui conditionnent les performances des activités de maintenance. En effet, l'indisponibilité du lien TIC rend les connaissances externalisées indisponibles et conduit à une perte directe de performance. Dans la suite du mémoire, nous allons approfondir la caractérisation des ressources immatérielles (cf. chapitre III) et analyser plus finement certains de ces indicateurs lors de leur exploitation dans le chapitre IV (taux d'externalisation et taux d'échec du e-service).

CONCLUSION

Les développements de ce chapitre ont permis de formaliser la problématique étudiée dans un cadre normalisé et selon une modélisation objet. La modélisation proposée s'appuie sur des formalismes connus. Nous avons positionné nos travaux dans le cadre normatif ISO 9001 afin d'avoir des développements compatibles aux organisations industrielles. Dans ce cadre, nous avons suivi une approche objet permettant de définir les composants clés en associant modélisation statique et dynamique. Le problème ainsi posé, nous avons proposé des critères d'évaluation des performances des activités de e-maintenance, en analysant précisément les éléments modélisés. Ce cadre d'évaluation sera exploité dans le chapitre IV lors de la définition d'un cadre de performance permettant d'évaluer les performances de la e-maintenance.

Nous avons mis en évidence le rôle important joué par les ressources immatérielles avec le besoin en connaissances et compétences dans les décisions constituant les interventions de maintenance. Dans le chapitre suivant, nous approfondissons le rôle des acteurs de maintenance et de leurs décisions, notamment lors de collaborations. Nous nous intéressons également plus en détail aux ressources immatérielles, enjeu majeur de la décision, qui peuvent être détenues par les acteurs (tacites) ou capitalisées dans des bases de données (explicites).



CHAPITRE III. LES ACTIVITÉS DE DÉCISION COLLABORATIVE ET LEUR RÉORGANISATION

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la décision collaborative afin d'en décrire et d'en modéliser les mécanismes.

Nous proposons d'abord un complément bibliographique portant sur les travaux relatifs à la décision, au système décisionnel et à sa modélisation. Nous identifions trois situations types de collaboration couramment rencontrées dans toute organisation, y compris en e-maintenance.

Ensuite, nous étudions l'influence de la collaboration sur l'organisation décisionnelle et sur la prise de décision. Nous appuyant sur le formalisme GRAI, nous étendons les principes de modélisation d'un centre de décision et proposons une analyse des effets du regroupement de centres de décision collaborant.

Enfin, les ressources immatérielles constituant un élément clé dans l'élaboration d'une décision, nous en étudions les caractéristiques. Nous considérons alors les aspects qualitatifs et quantitatifs tout en distinguant les connaissances, des compétences.

III.1 COMPLÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

En complément de la synthèse bibliographique établie dans le chapitre I, nous présentons dans ce paragraphe les éléments et techniques de modélisation de la décision. Nous nous intéressons plus particulièrement à la modélisation du système décisionnel d'une organisation et à la représentation plus détaillée des centres de décision (ou nœuds décisionnels). Nous exploiterons par la suite ces primitives de modélisation issues de la méthode GRAI ainsi que d'autres éléments de la méthode : règles de décision, fonctionnement des centres de décision, du système décisionnel, cohérence et robustesse des décisions,...

III.1.1 Organisation décisionnelle et centre de décision

Dans une organisation, la prise de décision est supportée par le système décisionnel. Ce système décisionnel comme, par exemple, celui d'une entreprise ou d'un service de maintenance, peut être décomposé en unités de granularité décisionnelle appelées centres de décision (définis par GRAI) ou nœuds décisionnels.

III.1.1.1 Typologie des systèmes décisionnels

Parmi les travaux existants, il existe plusieurs modélisations du système décisionnel qui sont fonction de l'organisation physique du système considéré.

L'approche systémique proposée par Mélése [Mélése 72] et reprise notamment par Le Moigne [Le Moigne 77] et Simon [Simon 77] permet de décomposer un système de production en trois sous-systèmes (Figure III.1) : le système physique ou opérationnel, le système décisionnel et le système d'information. Le système physique est composé des processus permettant la transformation du flux physique. Le système d'information contient les informations nécessaires au pilotage du système physique. Ces informations peuvent être d'origine interne ou externe. Le système décisionnel élabore

l'ensemble des décisions en vue de piloter le système physique, à partir des informations fournies par le système d'information.

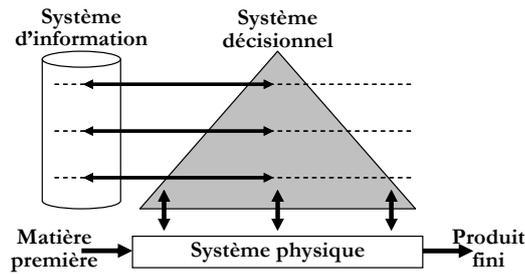


Figure III.1. Vision systémique d'une organisation

Le Moigne assimile toute entreprise ou organisation productrice de biens ou de services à un système de production. La fonction maintenance ne constitue qu'une partie d'une entreprise mais peut néanmoins être assimilée à une organisation transformant des éléments d'entrée (équipements à maintenir) en éléments de sortie (équipements maintenus) par la réalisation d'interventions à valeur ajoutée. La fonction maintenance est donc assimilable à un système de production où le système physique est composé des équipements à maintenir et peut être étudiée selon l'approche systémique.

Le système décisionnel peut être lui-même décomposé en niveaux décisionnels, selon les horizons temporels : stratégique (décision à long terme), tactique (décision à moyen terme) et opérationnel (décision à court terme) définis par [Anthony 65].

La spécification de ces trois niveaux est à relier à une organisation décisionnelle hiérarchisée et composée de centres de décision [Le Moigne 77], [Mesarovic 80] (Figure III.2) où chaque centre a un horizon spécifique.

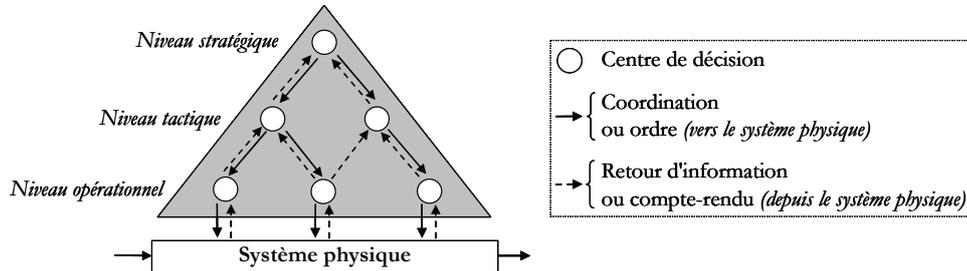


Figure III.2. Système décisionnel hiérarchisé et composé de centres de décision

La hiérarchisation des décisions permet de les décomposer et de les organiser, diminuant ainsi leur complexité. Avec cette représentation, le système décisionnel est composé de centres de décision qui peuvent :

- se coordonner entre eux,
- échanger des ordres avec le système physique,
- faire un suivi des actions et des résultats obtenus.

L'organisation décisionnelle sous forme hiérarchique bien qu'étant la forme la plus courante, n'est pas la seule existante. D'autres formes d'organisation sont aussi à considérer.

L'organisation dite "supervisée" (ou mixte) est moins hiérarchisée [Saad 96] : les différents centres de décision coopèrent entre eux et sont simplement supervisés par un centre de niveau supérieur. Le système peut être distribué sur plusieurs sites géographiques (Figure III.3).

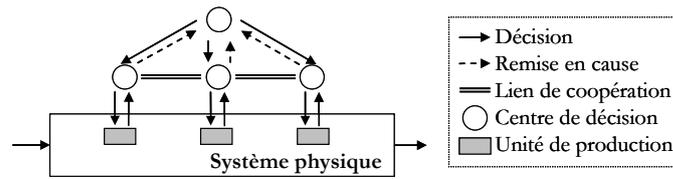


Figure III.3. Organisation décisionnelle supervisée et distribuée

Par rapport à l'organisation hiérarchisée, ce type d'organisation est moins structuré et compte moins de niveaux décisionnels ; il s'adresse plutôt aux systèmes physiques distribués.

L'organisation "hétérarchique" est un réseau de centres de décision (Figure III.4) marqué par l'absence de niveau décisionnel et de relation hiérarchique [Erschler 76].

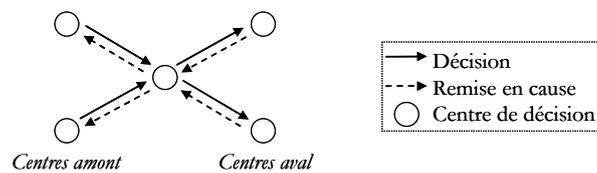


Figure III.4. Réseau de centres de décision

Ce type d'organisation est également destiné aux systèmes distribués ; la décision d'un centre est contrainte par les décisions des centres amont et contraint elle-même les décisions des centres aval.

Par rapport à ces trois principales organisations décisionnelles : hiérarchique, hétérarchique et supervisée, des variantes sont possibles, caractérisées par un pilotage hiérarchique (vertical) et une coordination (horizontale) plus ou moins importante.

Dans la suite de nos travaux, nous ne considérerons que la forme hiérarchique d'organisation car c'est la plus répandue, notamment en maintenance. Le système décisionnel de la maintenance est composé de plusieurs niveaux décisionnels avec des décisions prises à long, moyen et court termes.

III.1.1.2 Centre de décision (CD)

La notion de centre de décision (CD) a été définie dans la méthode GRAI afin de modéliser le système décisionnel d'une organisation. Nous présentons ci-dessous cette notion de CD et les éléments clés qui la caractérisent.

Plusieurs définitions existent dans la littérature ; voici les principales.

Breuil définit un CD comme un "ensemble d'activités ayant même horizon et même période, devant être exécutées suivant les mêmes objectifs donnés par un seul cadre de décision" [Breuil 84]. Un élément important dans cette définition est le temps. En effet, un CD doit considérer un certain intervalle de temps appelé "horizon" pour construire une décision, sachant que cette décision aura une durée de validité appelée "période" [Roboam 93].

Doumeingts précise qu'un CD est composé d'un cadre de décision comportant les objectifs à atteindre et les contraintes à respecter [Doumeingts 84]. Ce cadre de décision est défini par le CD hiérarchique

amont. L'auteur a également établi les relations de suivi et de coordination entre CD amont et CD aval et des relations de synchronisation entre CD d'un même niveau décisionnel.

Un CD est aussi basé sur des ressources de diverses natures (humaine, informatique ou matérielle) permettant de prendre des décisions [Giard 88].

Bitton précise la notion "d'activité" de Breuil, en faisant référence à un "ensemble d'activités d'une fonction donnée (type d'activités similaires à l'intérieur d'un système de décision donné), à un niveau temporel donné" [Bitton 90].

Marcotte complète ces définitions en indiquant qu'un CD peut, comme une organisation, être décomposé selon une approche systémique (systèmes d'information, décisionnel et physique) [Marcotte 95]. Marcotte a également proposé de compléter la notion de cadre de décision en intégrant les variables de décision et les critères de sélection dont dispose le CD considéré.

Exploitant le formalisme GRAI, nous avons étendu les principes de modélisation d'un centre de décision (CD) [Garcia 06] pour aboutir au formalisme proposé sur la Figure III.5. Ainsi, un CD est composé :

- d'un cadre de mission⁵ qui regroupe les éléments que le CD reçoit du CD amont et lui indiquant ce qu'il doit faire,
- d'un cadre de décision qui constitue toutes les ressources (physiques, informationnelles et humaines) dont le centre de décision dispose pour réaliser sa mission,
- de résultats qui représentent la production du centre de décision qu'il doit fournir au(x) centre(s) de décision aval,
- d'un suivi aval qui constitue les informations provenant du (ou des) centre(s) de décision aval,
- d'un suivi amont qui est un retour d'information fourni au(x) centre(s) de décision amont,
- d'un couple horizon / période (H / P) qui représente l'intervalle de temps considéré pour construire la décision et la durée de validité de la décision. Ce couple H / P est fonction du niveau décisionnel auquel le CD est associé.

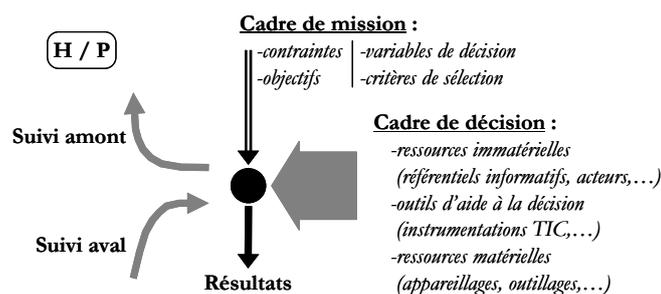


Figure III.5. Représentation d'un centre de décision

Nous avons défini le cadre de mission comme composé :

- d'objectifs : les résultats quantitatifs et / ou qualitatifs que le CD doit atteindre. Ces objectifs sont de diverses natures et doivent être déclinés en identifiant les facteurs de satisfaction client (coût,

⁵ Nous désignons par cadre de mission l'ensemble des caractéristiques définissant la mission du CD et par cadre de décision l'ensemble des ressources associées au CD.

délaï, qualité,...) et les facteurs de satisfaction acteurs (facilité d'emploi, justesse par rapport aux besoins ou personnalisation),

- de contraintes : les éléments que le CD doit respecter. Ces contraintes peuvent provenir des exigences du client (comme, par exemple, le respect des normes de sécurité interne), de l'entreprise (respect des procédures ou instructions de travail) ou de la société (respect du code du travail),
- de variables de décision : degrés de liberté dont dispose le CD et permettant d'atteindre les objectifs fixés,
- de critères de sélection : indicateurs permettant de quantifier et de comparer différentes décisions possibles.

Dans ce cadre de mission, certains éléments sont de type général et s'appliquent à toutes les missions, d'autres sont spécifiques et ne concernent que la mission courante. Dans la modélisation d'une intervention proposée au chapitre II, les classes sollicitation d'intervention et équipement constituent une partie du cadre de mission du CD qui doit intervenir sur l'équipement à maintenir.

Comme pour le cadre de mission, nous avons décomposé le cadre de décision en :

- ressources immatérielles : référentiels informatifs et acteurs (cf. paragraphe 0) apportant des connaissances, compétences, savoir-faire,... (modélisés au paragraphe III.4) pour la réalisation de la mission,
- outils d'aide à la décision : instrumentations TIC (ordinateurs, logiciels,...),
- ressources matérielles : appareillages, outillages,...

Ainsi, les classes instrumentation, réseau, référentiel informatif, acteur et appareillage / outillage constituent les éléments du cadre de décision du CD.

De plus, nous pouvons rattacher à chaque centre de décision les processus décisionnels présentés dans le chapitre I (cf. I.3.1.2) avec les activités de préparation des données nécessaires à la prise de décision, celles d'évaluation des solutions par rapport aux objectifs, ...

III.1.2 Méthode GRAI

III.1.2.1 Présentation

La méthode GRAI (Grphe à Résultats et Activités Interreliés) est l'une des rares méthodes permettant de modéliser les activités de décision. Ce manque de méthodes concernant la décision s'explique par la complexité à représenter les activités, les mécanismes mis en jeu, les techniques de choix et d'évaluation qui conduisent à la prise de décision.

La méthode GRAI a été mise au point au laboratoire LAPS / GRAI de Bordeaux au cours des années 70-80 par Doumeingts [Doumeingts 84] et Breuil [Breuil 84], avec les compléments apportés notamment par [Roboam 93]. Elle permet d'analyser le système décisionnel d'une organisation en mettant en évidence les enjeux décisionnels et d'étudier ainsi son fonctionnement.

Pour appliquer la méthode GRAI à une organisation, il est nécessaire de s'appuyer sur l'approche systémique [Mélèse 72] et de décomposer cette organisation en système physique, système d'information et système décisionnel, comme présenté au paragraphe III.1.1.1.

Le modèle GRAI est formé de deux principaux outils de modélisation :

- la grille GRAI qui permet de décomposer le système décisionnel en centres de décision,

- les réseaux GRAI qui permettent de détailler le fonctionnement des centres de décision de la grille GRAI.

La grille GRAI est basée sur une décomposition du système décisionnel suivant deux axes [Doumeings 84] :

- temporel, avec des périodes et des horizons de décision décroissants,
- fonctionnel, avec les différentes fonctions de l'organisation.

Au sein de la grille GRAI, les objectifs d'un CD sont issus du CD hiérarchiquement supérieur et transmis au moyen d'un cadre de mission qui représente ainsi le lien décisionnel d'un CD à l'autre. Il contient les informations nécessaires à la prise de décision par le CD, dont principalement : les performances ou objectifs à atteindre, les contraintes à respecter, les variables de décision et un ensemble de procédures de mise en œuvre des variables de décision.

L'enchaînement des cadres de mission d'un CD à l'autre crée une hiérarchie pyramidale des CD jusqu'au niveau du système physique de production. Nous obtenons ainsi une décomposition des cadres de décision correspondant à une décomposition de la structure d'objectifs et des moyens associés. Le CD a pour mission d'utiliser les moyens mis à sa disposition pour atteindre les objectifs transmis par le CD hiérarchiquement supérieur. Les résultats de ces décisions sont évalués par des indicateurs de performance communiqués au CD afin que celui-ci vérifie la satisfaction des objectifs qui lui sont assignés et envisage éventuellement de nouvelles décisions.

À chaque case de la grille est associé un centre de décision pour lequel il est possible de construire un réseau GRAI permettant de décrire le fonctionnement interne de ce centre.

L'intérêt de cette modélisation est de mettre en évidence les flux d'information et les relations décisionnelles entre les centres de décision composant une organisation.

III.1.2.2 Règles décisionnelles

Les modélisations GRAI sont basées sur des règles et principes décrivant le fonctionnement d'une organisation, en se concentrant sur les relations (ascendantes et descendantes) entre les centres de décision et sur leur fonctionnement.

Ces règles sont issues du modèle de référence GRAI d'un système de conduite de production établi à partir des travaux de [Breuil 84] et [Doumeings 84].

Nous présentons ici les principales règles de cohérence des modèles GRAI reformulées dans [Roboam 93], que nous allons considérer dans notre analyse de la collaboration de CD.

- Le couple horizon / période doit être unique pour chaque niveau décisionnel.
- Pour un niveau donné, l'horizon de prise de décision doit être supérieur à la période de remise en cause de ces décisions. Pour un CD, l'horizon de prise de décision doit être au moins supérieur au plus long cycle des activités qu'il pilote.
- Tout niveau de décision doit émettre au moins un cadre de mission vers le niveau inférieur.
- Tout centre émetteur d'un cadre de mission doit contenir une activité décisionnelle.
- Tout CD doit recevoir un cadre de mission d'un centre d'un niveau supérieur ou de même niveau.
- Tout CD ne devrait recevoir qu'un seul cadre de mission. Dans le cas où il y en a plusieurs, il faut vérifier qu'ils aient une origine commune.

- Plusieurs contraintes peuvent être appliquées à un CD si elles proviennent d'activités de décision différentes.
- Les cadres de mission doivent s'enchaîner et avoir la même origine.

D'autres règles concernent la coordination et la synchronisation de CD.

- Deux CD peuvent partager un même objectif, à condition qu'ils possèdent un CD supérieur qui les coordonne, c'est-à-dire qui définit des priorités sur les objectifs et qui synchronise les décisions concernées par ces objectifs.
- Lors d'une décentralisation conservant les objectifs, la coordination entre les CD est cohérente si les variables de décision de ces CD sont indépendantes.
- Les variables de décision sont indépendantes si les relations d'inclusion définissent des domaines disjoints.
- Deux CD qui partagent des variables de décision communes doivent, pour être synchronisés, recevoir d'un CD de niveau supérieur, un cadre de décision qui définit les domaines possibles de cette variable de décision, pour chacun des deux centres.

La cohérence des décisions lors de l'agrégation ou de la décomposition des décisions selon les niveaux décisionnels est également prise en compte dans les règles GRAI. Citons les travaux de Hétreux qui propose des critères de cohérence et de robustesse des décisions lors de l'agrégation / décomposition de décision [Hétreux 96]. Selon Hétreux, la robustesse des décisions est associée à leur agrégation : "une décision agrégée est dite robuste si elle assure l'existence d'au moins une décision détaillée". Il définit également la cohérence des décisions : "une décision détaillée est dite cohérente si elle est compatible avec la décision agrégée".

De par ses modes d'analyse et de formalisme, l'approche GRAI n'a pas la même performance à tous les niveaux décisionnels : elle se révèle plus adaptée pour les horizons à moyen et long termes.

La collaboration entre acteurs de maintenance met principalement en jeu des mécanismes de niveau opérationnel. Aussi, nous n'avons pas repris le formalisme de la grille GRAI dans nos développements mais nous avons retenu la notion de centre de décision avec ses représentations et caractéristiques décisionnelles.

III.1.3 Évolutions de GRAI

Dès les années 1990, la méthode GRAI a connu une évolution importante avec la méthode ECOGRAI qui associe des indicateurs de performance à la modélisation GRAI [Bitton 90]. Il existe des applications récentes de l'évaluation des performances basée sur GRAI, avec, notamment, les travaux de Ducq qui applique la méthode ECOGRAI pour améliorer les prises de décision dans le domaine aéronautique [Ducq 05]. Au paragraphe II.4, nous avons proposé des indicateurs de performance à partir d'une démarche semblable à celle menée dans ECOGRAI en considérant un service de maintenance et, plus particulièrement, les ressources immatérielles externalisées via les TIC.

Certains travaux ont porté sur la conception d'outils logiciels de modélisation GRAI, avec, par exemple, les travaux de Poler et Doumeingts [Poler 02]. Cet utilitaire, appelé "DGRAI", est basé sur les concepts GRAI. Il permet d'établir des modèles dynamiques et d'évaluer les décisions en termes de durée et / ou de qualité et, ainsi, d'aider les organisations dans leurs prises de décision.

D'autres travaux ont été axés sur les méthodes de modélisation en intégrant tout ou partie des concepts de GRAI. Citons, par exemple, les travaux de [Chen 97] qui s'est concentré sur les

méthodologies de modélisation et a comparé les méthodes GIM (GRAI Integration Methodology) et GERAM (Generic Enterprise Reference Architecture and Methodology).

Certains auteurs ont mis en relation GRAI et le concept d'interopérabilité comme, par exemple, les travaux de Daclin et de Blanc. Daclin a posé les concepts et bases de formalisation de l'interopérabilité décisionnelle [Daclin 06]. À partir de la méthode ECOGRAI, Blanc a apporté un complément sur les performances en vue d'améliorer l'interopérabilité des chaînes logistiques [Blanc 07].

Proche de nos travaux, citons aussi les développements de Ben Salem sur l'association UML et GRAI [Ben Salem 08]. Il s'agit d'un travail de recherche qui propose une technique de transformation de modélisations GRAI en diagrammes d'activités UML. Ce travail s'intéresse plus particulièrement aux actigrammes étendus de GRAI (troisième forme de modélisation après les grilles et les réseaux, non présentée dans ce mémoire), sans approfondir les mécanismes de prise de décision.

Ainsi, il existe de nombreuses études basées sur les concepts GRAI et axées sur la modélisation d'entreprise. Comme celles-ci, nous avons repris les concepts GRAI pour proposer une analyse et une représentation graphique des systèmes décisionnels et des centres de décision impliqués dans les phénomènes de collaboration.

III.2 SITUATIONS TYPES DE DÉCISION COLLABORATIVE

Les activités de collaboration sont des activités complexes qui peuvent être de différentes natures, en fonction des objectifs à atteindre, de l'environnement ou encore des acteurs impliqués. Pour essayer de formaliser les différents cas possibles, nous allons proposer une typologie de situations décisionnelles collaboratives.

Nous avons défini au paragraphe 1.3.3.4 le travail collaboratif comme étant "l'activité d'un groupe d'acteurs travaillant ensemble, avec un objectif commun, tout en partageant des ressources et des moyens de communication". Chaque acteur impliqué dans la collaboration peut alors être considéré comme un centre de décision. Ainsi, pour construire une décision, les CD partagent leur cadre de mission, leur cadre de décision et leurs informations de suivi. Il est à noter que la collaboration entre deux CD n'est possible que s'ils ont un cadre de mission commun définissant les objectifs de la collaboration. Pour modéliser ce partage mis en œuvre lors de la collaboration, nous allons nous appuyer sur le formalisme de la Figure III.5 et proposer la représentation illustrée sur la Figure III.6.

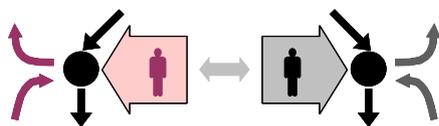


Figure III.6. Représentation d'activités de décision collaborative

Dans le cadre de la e-maintenance tel que défini dans le paragraphe 1.1.3.1.1, nous trouvons un opérateur local travaillant sur l'équipement, un mainteneur sur site et un expert délocalisé (cf. Figure III.7). Dans cet environnement type, nous avons plusieurs cas possibles de collaboration comme, par exemple, entre l'opérateur (local) et le mainteneur (atelier de maintenance) ou entre l'opérateur et l'expert (centre d'experts).

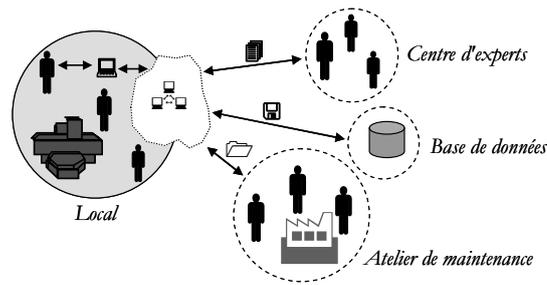


Figure III.7. Système distribué en e-maintenance

De plus, via les TIC, les CD peuvent avoir accès à des bases de données externalisées et ainsi :

- étendre leur cadre de décision : accès à de nouvelles connaissances et compétences distantes,
- compléter les suivis aval : meilleure remontée des états du (ou des) CD aval.

Toutefois, comme nous l'avons signalé au chapitre I, l'apport des TIC peut avoir des effets positifs ou négatifs sur les performances globales.

Le travail collaboratif consiste à mettre en relation plusieurs acteurs et à mutualiser leurs connaissances et compétences pour résoudre un problème (cf. définitions du paragraphe I.3.2). Cette collaboration peut être associée à deux types de décision :

- décision monoacteur : la décision (locale ou externalisée) est prise par un seul acteur,
- décision multiacteur : plusieurs acteurs mettent en commun leur cadre de décision pour assurer une mission conduisant à une décision commune.

III.2.1 Décision monoacteur

Les situations de décision monoacteur sont caractérisées par un seul décideur. Grâce aux TIC, la décision peut être :

- soit prise par l'acteur local qui a initialement la responsabilité du problème à résoudre,
- soit prise par un acteur externalisé lorsque l'acteur local ne disposant pas d'un cadre de mission et / ou d'un cadre de décision suffisant pour résoudre le problème, décide de transférer la décision à un autre acteur.

III.2.1.1 Décision locale

Cette première situation de décision locale est rencontrée lorsqu'un acteur reste décideur sur la mission dont il a la responsabilité.

Les TIC permettent d'enrichir le cadre de décision de l'acteur local en bénéficiant d'appuis externes, c'est-à-dire de ressources immatérielles distantes de son poste de travail. Ces ressources peuvent être explicites s'il s'agit de connaissances ou d'informations stockées dans des bases de données (Figure III.8a). Elles peuvent également être tacites si elles proviennent d'acteurs externalisés (Figure III.8b) ; ce cas correspond à une coopération d'acteurs (cf. paragraphe I.3.2.1.3). Quel que soit cet apport, l'acteur local reste seul maître de la décision.

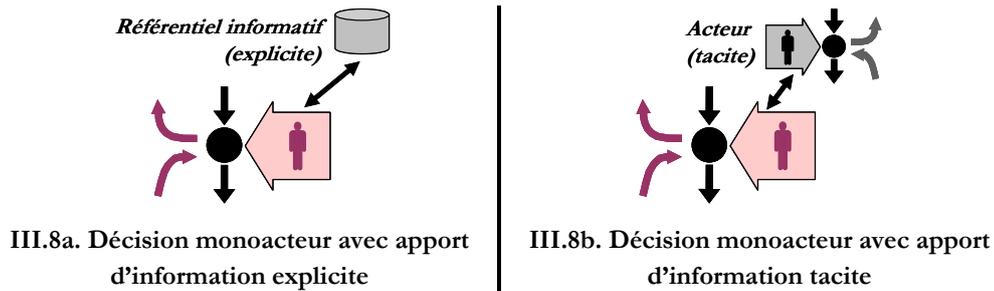


Figure III.8. Représentation de décision monoacteur

III.2.1.2 Décision externalisée

Cette seconde situation de décision monoacteur a lieu lorsque, malgré l'enrichissement externe, la décision sort du cadre de mission ou du cadre de décision de l'acteur local.

Dans ce cas, l'acteur local, initialement responsable du problème à résoudre et les prises de décision associées, se désengage de sa mission et la transfère à un acteur externalisé, plus qualifié pour réaliser la mission. Il est à noter que cette possibilité de transférer la décision à un acteur externalisé doit être formalisée dans le cadre de mission de chaque acteur.

Cette situation est représentée sur la [Figure III.9](#).

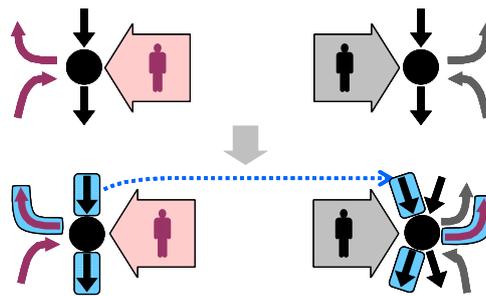


Figure III.9. Représentation de la décision externalisée

Après que la décision ait été externalisée, elle est à nouveau traitée comme une décision locale par l'acteur externalisé qui voit sa mission, son résultat et le suivi vers les CD amont modifiés par cette décision supplémentaire. La décision est donc prise par l'acteur externalisé. Par contre, la mise en œuvre de la décision peut être réalisée par un des deux acteurs ou par une autre personne.

III.2.2 Décision multiacteur

À la différence du cas précédent, la décision multiacteur implique une prise de décision commune. En termes de centres de décision (CD), cette situation peut se traduire par un regroupement de plusieurs CD pour créer un nouveau centre de décision collaboratif ([Figure III.10](#)). Le centre de décision créé dispose alors :

- du cadre de mission global provenant de la fusion des cadres de mission de chaque CD et celui relatif à la mission de la collaboration,
- des cadres de décision et des suivis des CD regroupés.

Ainsi, les CD ont une mission commune, ce qui correspond au concept de collaboration tel que défini dans le chapitre I (cf. paragraphe [I.3.2](#)).

Ce centre de décision collaboratif peut être permanent ou temporaire (fonction des cadres de mission origines de la collaboration) et, dans ce cas, dissout à la fin de la mission.

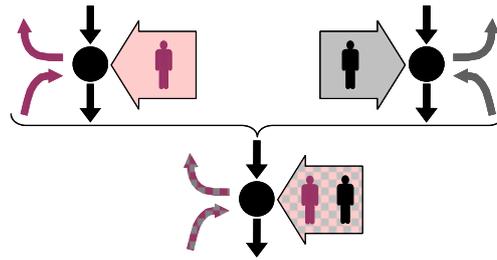


Figure III.10. Représentation d'une décision multiacteur

Nous pouvons également distinguer la manière dont la décision collaborative est construite par l'ensemble des acteurs impliqués :

- la simple juxtaposition des référentiels⁶ de chaque CD,
- la confrontation des référentiels de chacun avec des techniques multicritères,
- la création d'un nouveau référentiel à partir de la dynamique de la collaboration, tout en respectant les contraintes et objectifs initiaux.

Pour modéliser cette décision, nous pouvons aussi reconsidérer le processus de décision collaborative proposé par Laborie (cf. Figure I.15 du paragraphe 1.3.3.1.2) [Laborie 06]. Sur la Figure III.11, nous reprenons le processus de Laborie afin d'étudier l'influence des étapes de ce processus sur les caractéristiques d'un centre de décision collaboratif.

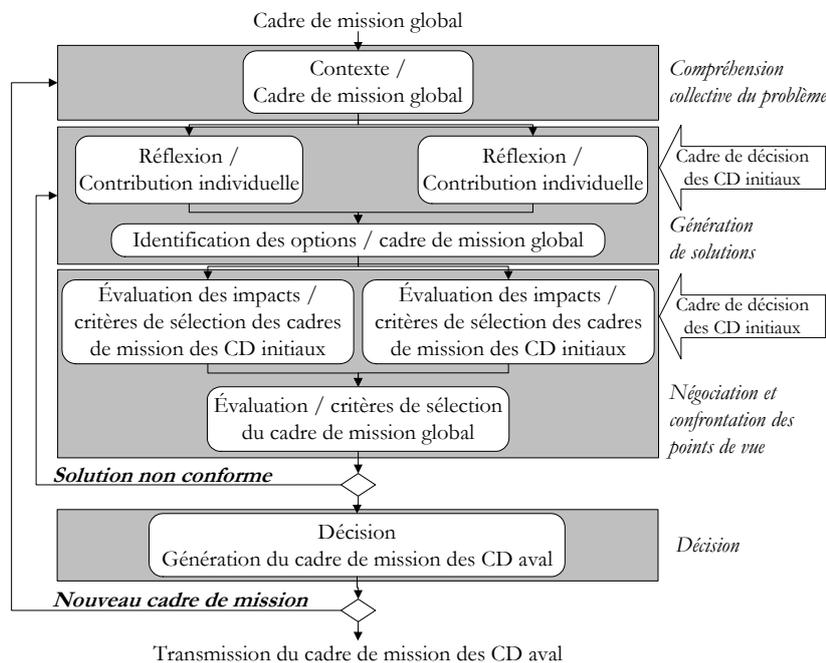


Figure III.11. Processus de décision collaborative adapté de Laborie

⁶ Un référentiel est un ensemble structuré d'éléments ou d'informations fixant un repère et une origine permettant d'appréhender une réalité particulière, de réaliser une évaluation,...

Lors de la première étape du processus (contexte de la décision), les CD mettent en commun leurs cadres de mission respectifs et prennent connaissance des éléments à respecter et des degrés de liberté disponibles (objectifs, variables de décision,...). L'assimilation du cadre de mission global par chaque CD est réalisée en exploitant les éléments du cadre de décision permettant de comprendre le problème à résoudre.

Lors de l'étape de génération de solutions, les CD construisent, individuellement, des solutions à l'aide de leur cadre de décision respectif et des informations de suivi dont ils disposent.

Lors de l'étape d'évaluation, les CD comparent les performances de chaque solution au cadre de mission global pour vérifier si elles répondent bien aux objectifs fixés et si elles respectent les contraintes imposées. Chaque CD évalue la performance des solutions à partir des critères de sélection définis dans son cadre de mission. Si aucune solution n'est satisfaisante, les CD reviennent à une phase de recherche individuelle de solutions, sans modifier le cadre de mission global.

La dernière étape du processus consiste à décider de la solution à retenir qui servira de cadre de mission pour le (ou les) CD aval. Cette décision doit être acceptée et comprise par l'ensemble des CD collaborant. Si aucune solution n'est trouvée, les CD doivent redéfinir leur cadre de mission global.

D'une manière générale, lors des étapes de réflexion et d'analyse, les CD travaillent individuellement à l'aide de leur cadre de décision alors que, lors des étapes d'identification et d'évaluation, ils travaillent à partir du cadre de mission global correspondant au référentiel commun.

Il est à noter que lors de ce processus collaboratif, le cadre de décision de chaque CD impliqué est enrichi de cette expérience qui pourra être exploitée dans une prochaine résolution.

Nous venons de présenter trois situations types de décision qui nous servent de base pour analyser maintenant plus en détail le phénomène de la collaboration de CD.

III.3 ANALYSE DE LA COLLABORATION DE CENTRES DE DÉCISION

Dans ce paragraphe, nous proposons d'analyser la création d'un centre de décision collaboratif en ayant une approche générique et de définir les critères et conditions générales de la collaboration de CD. De plus, nous allons nous placer dans le cadre d'une collaboration entre CD distants, collaboration rendue possible grâce aux TIC.

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre I, l'intégration des TIC dans les systèmes décisionnels a modifié les modes de travail, les conditions de prise de décision, les relations entre CD et les cadres de mission et de décision de chaque CD. Face à ce constat, il est nécessaire d'analyser l'organisation décisionnelle en tenant compte des phénomènes de collaboration et des nouvelles possibilités offertes par les TIC. Pour cela, nous nous appuyons sur la notion de centre de décision pour, d'une part, caractériser la collaboration et, d'autre part, analyser les conditions de cette collaboration influençant toute l'organisation décisionnelle considérée.

Nous mettrons en œuvre ces résultats dans notre cadre d'étude : la e-maintenance.

III.3.1 Principe de collaboration de CD

Nous nous plaçons dans le cadre d'une collaboration de CD, c'est-à-dire avec une décision multiacteur (cf. paragraphe III.2.2), au sein d'un système décisionnel. La création d'un centre de décision collaboratif (CDC) à partir du regroupement de plusieurs CD, conduit à des évolutions et à des modifications plus ou moins importantes du système décisionnel initial.

REMARQUE. Notre approche s'inscrit dans le cadre d'une amélioration de l'intégration des TIC. Nous écartons dès maintenant le cas d'une réorganisation d'un système décisionnel suite à la disparition d'un ou de plusieurs centres de décision faisant suite, par exemple, à un plan de licenciement.

Notre analyse s'appuie sur la représentation des CD établie dans la méthode GRAI (cf. paragraphe III.1.1.2). Le regroupement de deux CD devant collaborer conduit à la création d'un CDC possédant les caractéristiques (cadre de mission, cadre de décision,...) déduites de celles du CD origine de la collaboration et des 2 CD regroupés.

Nous décrivons, tout d'abord, le principe général de regroupement de deux CD (CD₁ et CD₂) impliqués dans la création d'un CDC pour répondre à une mission établie par le CD origine (CD₀). Ce principe est représenté sur la Figure III.12.

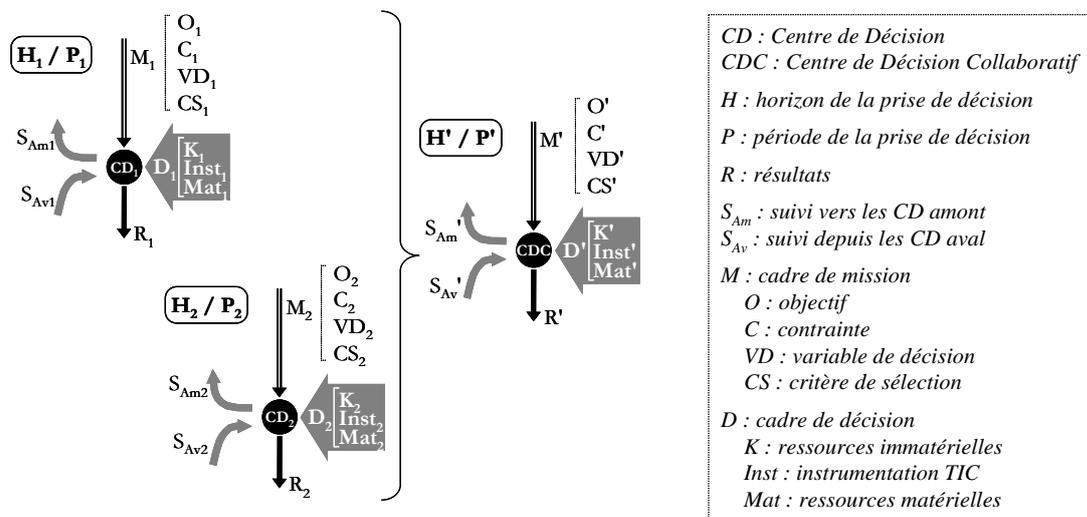


Figure III.12. Principe de réorganisation et de formation d'un Centre de Décision Collaboratif

Avant le regroupement, les CD₁ et CD₂ sont considérés séparément, chaque CD étant doté de ses caractéristiques propres (cadre de mission, cadre de décision,...). Toutefois, ils ont généralement en commun une partie de leur cadre de mission provenant d'un CD hiérarchique supérieur.

Après regroupement, le CDC créé possède ses propres caractéristiques et règles décisionnelles qui doivent respecter la cohérence du fonctionnement, des décisions prises et de son insertion / position dans l'organisation décisionnelle.

Le regroupement est basé sur l'écriture d'un ensemble de relations liant les caractéristiques des CD initiaux avant regroupement (celles des CD₁ et CD₂) et de la mission dédiée à la collaboration (M₀) à celles du CDC formalisant cette collaboration.

Nous formalisons les caractéristiques du nouveau CDC à l'aide d'un ensemble de relations mathématiques.

Pour la mission : $M' = f(M_0, M_1, M_2)$ décomposable en :

$$O' = f_1(O_0, O_1, O_2)$$

$$C' = f_2(C_0, C_1, C_2)$$

$$VD' = f_3(VD_0, VD_1, VD_2)$$

$$CS' = f_4(CS_0, CS_1, CS_2)$$

Pour le cadre de décision : $D' = g(D_1, D_2)$ décomposable en :

$$K' = g_1(K_1, K_2) \text{ (avec } K : \text{connaissances)}$$

$$Inst' = g_2(Inst_1, Inst_2)$$

$$Mat' = g_3(Mat_1, Mat_2)$$

Pour les résultats : $R' = h(R_0, R_1, R_2)$

Pour les suivis : $S_{Am}' = j(S_{Am0}, S_{Am1}, S_{Am2})$
 $S_{Av}' = k(S_{Av0}, S_{Av1}, S_{Av2})$

Pour le couple horizon / période (H' / P') : $H' = f(H_0, H_1, H_2)$ et $P' = f(P_0, P_1, P_2)$.

Initialement, dans la méthode GRAI, un niveau décisionnel est défini par un même horizon et une même période. Un CD étant associé à un niveau décisionnel, il est formé des activités ayant des horizons et périodes identiques. Le CDC doit aussi respecter cette règle GRAI et aura un couple H / P fonction de la mission origine de la collaboration ou des CD collaborant.

Le CDC est donc caractérisé par la mission de collaboration à l'origine de sa création et les caractéristiques des CD regroupés.

III.3.2 Caractérisation d'un CDC

Dans ce paragraphe, nous proposons de détailler les caractéristiques d'un centre de décision. Pour cela, nous avons analysé les différents cas possibles et identifié plusieurs critères permettant de caractériser la collaboration de CD et conditionnant l'existence du CDC :

- le cadre général : toute collaboration doit être au préalable autorisée par la hiérarchie,
- le besoin origine de la collaboration : la nécessité de créer un centre de décision collaboratif peut avoir plusieurs origines,
- la persistance des cadres de mission initiaux : suite à l'intégration dans un CDC, le cadre de mission des CD collaborant peut subir des modifications ou évolutions plus ou moins importantes,
- l'horizon et la période du CDC : ils dépendent du cadre général et du besoin origine,
- le type de regroupement : plusieurs associations sont possibles en fonction de la position initiale des CD dans le système décisionnel hiérarchisé,
- les règles décisionnelles de fonctionnement et de cohérence des CD impliqués dans la collaboration (règles issues de GRAI).

III.3.2.1 Cadre général

Quel que soit le CDC considéré, pour qu'il puisse être créé et exister, il faut au préalable qu'un CD amont ou que des CD de niveau hiérarchique élevé décident d'autoriser des CD hiérarchiquement inférieurs à collaborer. Ils définissent alors un cadre général de mission pour la création d'un CDC en identifiant clairement les modalités de regroupement, les missions couvertes par ce cadre et les CD pouvant être potentiellement intégrés dans le CDC. Cette autorisation peut :

- être dédiée à une activité ponctuelle dont la date d'occurrence peut être prévue ou imprévue,
- ou concerner une activité récurrente nécessitant une collaboration régulière.

De même, elle peut être valide durant un intervalle de temps plus ou moins important. La durée de validité d'un CDC peut être :

- limitée pour répondre à un besoin ponctuel,
- durable pour répondre à un besoin durable.

Ce cadre général peut être défini à l'aide des mêmes éléments qu'un cadre de mission, c'est-à-dire avec des objectifs, des contraintes, des critères et des variables de décision.

Il est à noter que cette collaboration et le CDC résultant doivent correspondre à une action programmée et autorisée. Toutefois, la mise en œuvre effective du CDC peut être :

- planifiée et prévue, comme une intervention préventive de niveau de complexité élevé nécessitant l'aide d'un expert,
- non planifiée et imprévue, comme une intervention en maintenance curative.

III.3.2.2 Besoin origine de la collaboration

Il s'agit de l'élément clé de la collaboration définissant le cadre de mission du CDC avec les contraintes et les objectifs que doivent satisfaire les CD collaborant.

L'élément déclencheur de la collaboration correspond à un besoin, pour un ou plusieurs CD, de collaborer à la réalisation d'une mission. Ce besoin de collaboration peut être émis par :

- un CD amont : au lieu de définir la mission respective de plusieurs CD aval, un CD amont peut leur demander de collaborer ; il définit alors le cadre de mission du CDC,
- un CD aval : le CD aval constate un besoin qui sort de son cadre de mission et / ou de son cadre de décision mais qu'il pourrait satisfaire en collaborant avec un autre CD. Il demande alors au CD amont l'autorisation de créer un CDC dont le cadre de mission global correspond à sa mission actuelle.

Dans le cas d'une origine amont, les CD intégrés au CDC appartiennent en majorité à un niveau hiérarchique inférieur, alors que dans le cas d'une origine aval, ils appartiennent majoritairement à un niveau supérieur.

III.3.2.3 Persistance des cadres de mission

Suite à la création d'un CDC, le cadre de mission des CD collaborant peut subir des évolutions plus ou moins conséquentes.

Concernant la mission, la réalisation de la mission globale du CDC peut devenir l'unique mission d'un CD ou n'en constituer qu'une partie. Ainsi, il peut y avoir maintien ou disparition des précédentes missions affectées à un CD.

Les éléments (objectifs, contraintes, variables et critères de décision) composant le cadre de mission du CDC dépendent directement de la mission à réaliser et sont donc fonction de l'origine de la collaboration :

- dans le cas d'une origine amont, les CD doivent considérer les éléments tels qu'ils ont été définis par le CD amont. Ces éléments peuvent sortir du cadre de mission général d'un CD intégré dans le CDC ce qui peut nuire à la qualité des résultats,
- dans le cas d'une origine aval, les éléments à considérer sont ceux définis par le CD aval ayant émis le besoin de collaborer. Toutefois, dans ce cas, le CD intégré doit aussi considérer les éléments définis dans son cadre de mission global et l'autorisant à collaborer.

En plus de l'origine de la collaboration, la persistance du cadre de mission dépend de la durée de la collaboration. Dans le cas d'une collaboration ponctuelle, les CD collaborant conservent leurs missions

initiales et la mission de la collaboration (M') vient s'ajouter à celles-ci. Lorsque la mission M' est réalisée, le CDC est dissout et chaque CD récupère son cadre de mission et son cadre de décision d'origine.

Dans le cas d'une collaboration durable, il est nécessaire de réorganiser les missions des CD regroupés et de les combiner avec la mission de la collaboration. Lorsque la mission M' est réalisée, le CDC est temporairement dissout et chaque CD travaille sur la partie aménagée de son cadre de mission.

III.3.2.4 Horizon et période du CDC

L'horizon considéré lors de la prise de décision des CD collaborant est défini par le CD origine de la collaboration :

- le CD amont origine de la collaboration peut imposer au CDC de travailler avec son horizon (celui de son niveau décisionnel) ou celui des CD collaborant,
- le CD aval origine de la collaboration "force" les CD (d'un niveau hiérarchique supérieur) à considérer son horizon.

La période du CDC correspond à la durée de validité des décisions prises lors de la collaboration. De manière similaire à l'horizon, la période est définie par le CD amont dans le cas d'une origine amont ; dans le cas d'une origine aval, elle correspond à la plus courte période des missions des CD collaborant.

En fonction des missions considérées et, de ce fait, de l'origine du besoin, la période du CDC peut être de type :

- moyen ou long terme : le CDC a une pérennité dans le temps et les mêmes CD doivent régulièrement collaborer pour répondre à une mission récurrente,
- opérationnel : le CDC est ponctuel et vise à répondre à un besoin imprévu mais qui respecte le cadre général de collaboration. Les CD collaborant sont choisis en fonction de la mission à remplir.

Pour illustrer ces deux cas, nous pouvons faire une analogie avec le domaine de la Qualité où il existe :

- des cercles qualité : groupes d'acteurs, de composition constante, qui collaborent régulièrement pour améliorer à froid des problèmes (en général du service),
- des groupes d'intervention : groupes d'acteurs, de composition variable, qui collaborent ponctuellement pour traiter à chaud un problème majeur pour l'entreprise.

III.3.2.5 Types de regroupement de CD

Concernant les possibilités de regroupements de CD appartenant à une organisation quelconque, nous avons identifié les quatre configurations types (R_i) tel que cela est représenté sur la [Figure III.13](#).

Comme nous l'avons déjà signalé, les caractéristiques du CDC résultant sont fonction de l'origine du besoin de collaboration (qui peut être défini comme le requis) et des CD initiaux, du positionnement de ces CD dans l'organisation décisionnelle initiale et de leurs interrelations dans la collaboration (qui peut être défini comme l'acquis).

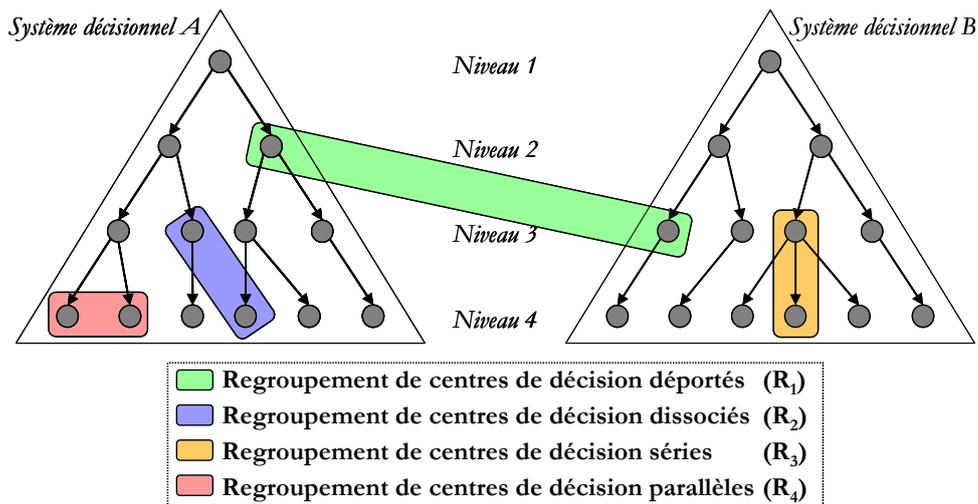


Figure III.13. Typologie des regroupements R_i de CD

Dans la Figure III.13, nous avons considéré une organisation composée de plusieurs structures décisionnelles comme, par exemple, la maintenance (système décisionnel A) et la production ou un client délocalisé (système décisionnel B). Dans ce contexte générique, nous avons identifié :

- le regroupement R_1 qui concerne deux CD n'appartenant pas au même système décisionnel, sans lien direct et sans (forcément) appartenir au même niveau décisionnel,
- le regroupement R_2 (semblable à R_1) qui concerne deux CD sans lien direct mais appartenant au même système décisionnel,
- le regroupement R_3 qui traduit la collaboration de deux CD consécutifs, ces deux CD sont dits "séries",
- le regroupement R_4 qui représente la collaboration de deux CD du même niveau décisionnel et ayant un même CD amont ; ces deux CD sont dits "parallèles".

Il est à noter que même pour la configuration R_1 , il est nécessaire qu'un CD hiérarchiquement supérieur ait au préalable défini le cadre général de la collaboration pour qu'elle puisse exister.

Ainsi, les critères clés permettant de caractériser un regroupement entre deux CD sont :

- l'appartenance ou non à un même système décisionnel,
- le niveau décisionnel auquel sont liées les notions d'horizon et de période,
- l'existence d'un lien hiérarchique direct (ascendant ou descendant).

Les quatre regroupements peuvent être réalisés à n'importe quel niveau décisionnel, du niveau stratégique au niveau opérationnel.

En fonction du regroupement considéré, les apports au niveau du cadre de décision et du cadre de mission sont différents. Nous proposons dans le Tableau III.1 une analyse des principaux intérêts des regroupements (intérêt proportionnel aux signes "+").

Composants d'un CD		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
Cadre de mission	Objectifs			+++	
	Contraintes			+++	
	Variables de décision	+++	++		
	Critères de décision	+++	++	++	
Cadre de décision	Ressources immatérielles	+++	+++		+++
	Ressources matérielles	+	+		+++
Suivi	Suivi amont			+	+
	Suivi aval			+++	

Tableau III.1. Intérêts des regroupements R_i de CD

Il est à noter que l'intérêt majeur du regroupement R₃ peut être :

- une révision des objectifs et contraintes à respecter, dans le cadre d'une origine aval,
- un meilleur suivi aval, dans le cadre d'une origine amont.

Ainsi, lors du choix des CD à intégrer dans le CDC, il faudra identifier quels sont les apports nécessaires pour obtenir une collaboration efficace et efficiente et ainsi rechercher la meilleure adéquation entre :

- caractéristiques requises du CDC pour remplir la mission,
- et caractéristiques acquises par les CD retenus pour collaborer.

À l'aide de ces quatre regroupements élémentaires, il est possible d'envisager n'importe quel regroupement de CD pour la création d'un CDC au sein d'un système décisionnel.

III.3.2.6 Règles décisionnelles

Quel que soit le type de regroupement R_i considéré ou l'origine de la collaboration, la création d'un CDC respecte les règles de GRAI, présentées au paragraphe III.1.2.2.

Le CD hiérarchiquement supérieur ou le CD amont autorisant deux CD à collaborer, devra veiller au respect des conditions concernant les cadres de mission (objectifs, contraintes, variables de décision), lors de la définition de l'autorisation de collaboration ou lors de l'établissement du cadre de mission de la collaboration.

III.3.2.7 Synthèse

À partir des précédentes caractéristiques d'un CDC et des principes de regroupement (cf. paragraphe III.3.1), nous allons considérer la collaboration entre trois CD et définir les caractéristiques (cf. Tableau III.2) en utilisant le symbolisme suivant :

- X' : caractéristique X relative au CDC (global),
- X_{0-Am} : caractéristique X relative au CD amont origine de la collaboration,
- X_{0-Av} : caractéristique X relative au CD aval origine de la collaboration,
- X₁ ou X₂ : caractéristique X relative aux CD collaborant avec le CD origine,
- X_{Sup} : caractéristique X relative à un CD hiérarchiquement supérieur.

Suite à la demande de collaboration, nous supposons que deux CD (CD₁ et CD₂) engagent une collaboration avec le CD origine et créent, ensemble, un CDC.

Il est à noter que dans le cas d'une origine :

- amont : CD₁ et CD₂ sont supposés appartenir à un niveau hiérarchique inférieur (Figure III.14a),
- aval : CD₁ et CD₂ sont supposés appartenir à un niveau hiérarchique supérieur (Figure III.14b).

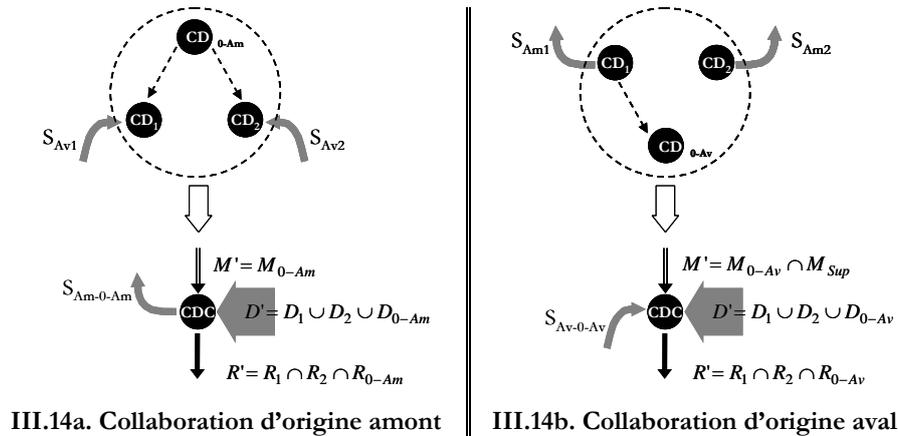


Figure III.14. Deux types d'origine de la collaboration (amont et aval)

Sur la Figure III.14, nous avons représenté les principales caractéristiques décisionnelles des CD impliqués dans la collaboration et du CDC, distinguant l'origine amont ou aval de la collaboration. Ces caractéristiques sont détaillées dans le Tableau III.2.

Configurations		Origine amont	Origine aval
Caractéristiques			
Mission du CDC		$M' = M_{0-Am}$	$M' = M_{0-Av} \cap M_{Sup}$
Horizon / Période		$H' = \max(H_1, H_2)$ ou H_{0-Am} $P' = \min(P_1, P_2)$ ou P_{0-Am}	$H' = H_{0-Av}$ $P' = P_{0-Av}$
Cadre de décision		$D' = D_1 \cup D_2 \cup D_{0-Am}$	$D' = D_1 \cup D_2 \cup D_{0-Av}$
Résultats		$R' = R_1 \cap R_2 \cap R_{0-Am}$	$R' = R_1 \cap R_2 \cap R_{0-Av}$
Suivis	Amont	$S_{Am}' = S_{Am-0-Am}$	$S_{Am}' = S_{Am1} \cup S_{Am2}$
	Aval	$S_{Av}' = S_{Av1} \cup S_{Av2}$	$S_{Av}' = S_{Av-0-Av}$

Tableau III.2. Synthèse des caractéristiques décisionnelles du CDC en fonction des CD initiaux

Quel que soit le CDC, le cadre de mission est défini par le CD origine de la collaboration avec, pour une origine aval, l'intégration de l'autorisation de collaborer établie par un CD hiérarchiquement supérieur (M_{Sup}).

Le couple horizon / période correspond :

- soit à H_{max} et P_{min} des CD impliqués dans le CDC et concernés par la décision, soit au couple du CD amont origine de la collaboration, pour une origine amont,
- soit à la valeur du CD origine de la collaboration, pour une origine aval.

Quelle que soit l'origine, les CD impliqués dans le CDC mettent en commun et partagent leur cadre de décision.

Le résultat du CDC correspond à l'intersection du résultat des actions de chaque CD impliqué avec une prise de décision commune et, donc, une validation collective comme nous l'avons illustré à l'aide du processus décisionnel de la Figure III.11. C'est pour cela qu'apparaissent les résultats R₁ et R₂ fournis par les CD₁ et CD₂ en réponse à la mission M' de collaboration.

Pour les suivis, le suivi amont du CDC correspond :

- au suivi amont du CD origine dans le cas d'une origine amont,
- au suivi amont des CD collaborant dans le cas d'une origine aval.

De la même manière, le suivi aval du CDC correspond au suivi des CD collaborant pour une origine amont et au suivi du CD aval pour une origine aval.

Le cadre de mission des CD peut également être décomposé en fonction des objectifs, contraintes, variables de décision et critères de sélection.

Nous présentons dans le [Tableau III.3](#) le détail des caractéristiques du cadre de mission selon l'origine de la collaboration.

<i>Caractéristiques du cadre de mission</i>	<i>Origine amont</i>	<i>Origine aval</i>
Objectif	$O' = O_{O-Am}$	$O' = O_{O-Av} \cap O_{Sup}$
Contraintes	$C' = C_{O-Am} \cup [(C_1 \cup C_2) \cap C_{O-Am}]$	$C' = C_{O-Av} \cup [(C_1 \cup C_2) \cap C_{Sup}]$
Variables de décision	$VD' = [(VD_1 \cup VD_2) \cap VD_{O-Am}] \cup VD_{O-Am}$	$VD' = [(VD_1 \cup VD_2) \cap VD_{Sup}] \cup VD_{O-Av}$
Critères de sélection	$CS' = [(CS_1 \cup CS_2) \cap CS_{O-Am}] \cup CS_{O-Am}$	$CS' = [(CS_1 \cup CS_2) \cap CS_{Sup}] \cup CS_{O-Av}$

Tableau III.3. Détail du cadre de mission du CDC

D'une manière générale, chaque CD impliqué dans la collaboration apporte ses propres éléments (objectif, contraintes,...) provenant de son cadre de mission. Toutefois, ces éléments doivent respecter les éléments définis par :

- le CD amont dans le cas de l'origine amont,
- le cadre général défini par le CD hiérarchiquement supérieur.

Nous avons proposé des éléments permettant d'analyser la collaboration de CD, à partir des caractéristiques définies au paragraphe III.3.1. Nous allons considérer plus en détail la collaboration de CD dans le cadre de la e-maintenance.

III.3.3 Application à la e-maintenance

Nous nous plaçons dans le cadre de travail défini dans le chapitre II et dans le cas de la réalisation d'une intervention corrective sur un équipement. Nous retenons les actions correctives car elles ont un caractère imprévu, rendant les situations de collaboration plus critiques que celles préventives. En préventif, le CD engagé dispose généralement du cadre de décision adapté à son cadre de mission sauf erreur d'affectation de personnel, de transmission d'informations ou de besoins d'actions correctives constatés au cours de l'intervention préventive.

Nous associons à cette action corrective trois catégories d'acteurs : les experts, les mainteneurs et les opérateurs de production. Nous considérons qu'à chaque catégorie, peut être associé un CD lié aux autres par des relations hiérarchiques, l'ensemble formant l'organisation décisionnelle du service maintenance.

Suite à l'occurrence d'une défaillance sur un équipement, un CDC est créé pour réaliser l'intervention. La collaboration considérée dans cette application ne peut se faire que via les TIC.

Nous reprenons les critères définis au paragraphe III.3.2 et les appliquons à ce cadre d'étude, pour définir dans la suite de ce paragraphe cette collaboration de CD via les TIC.

III.3.3.1 Cadre général

Le cadre général des collaborations possibles est défini le plus souvent par le responsable du service maintenance. Il doit définir clairement :

- la conduite à suivre lors de la détection d'une défaillance sur un équipement (en général, par l'opérateur en charge de l'équipement) ou la déclaration par un opérateur ou un mainteneur d'une défaillance non résolvable,
- le type de dysfonctionnement pouvant être traité et le type de moyens pouvant être engagé en fonction de la complexité de la défaillance et de la criticité de l'équipement,
- les prérogatives de création d'un CDC,
- la cartographie des acteurs potentiellement disponibles via les TIC ainsi que leur domaine de compétences (ressources immatérielles).

Dans le contexte de la e-maintenance, le cadre général est de type "durable", c'est-à-dire défini pour un certain volume d'interventions correctives et pour une période de validité donnée. Ce volume d'intervention est évalué par rapport aux historiques de défaillances.

III.3.3.2 Besoin origine

Les opérateurs en charge d'un équipement sont généralement les premiers à détecter l'occurrence d'une défaillance et, de ce fait, sont l'origine du besoin de collaboration.

Le besoin est donc d'origine aval : l'opérateur ou le mainteneur ne pouvant résoudre seul la défaillance, il fait appel à un autre CD pour l'aider dans sa mission. Le besoin de collaborer peut provenir d'un manque au niveau :

- du cadre de décision : il ne dispose pas des connaissances et / ou compétences requises pour résoudre seul,
- du cadre de mission : il ne dispose pas des degrés de liberté ou des autorisations nécessaires.

Nous considérons que le CD aval origine ne peut se désengager d'une partie ou de la totalité de sa mission. Dans tous les cas, il collabore avec les CD amont pour mener à bien l'intervention (respect de la définition de la collaboration).

Ainsi, le cadre de mission du CDC correspond à celui du CD origine de la collaboration et est caractérisé par :

- une mission : remettre au plus vite l'équipement défaillant en état de bon fonctionnement,
- des contraintes : celles du CD origine et celles du cadre général correspondant à cette mission,
- des variables et critères de décision : les éléments du CD origine, du CD collaborant et ceux du cadre général correspondant à cette mission.

Le besoin de collaborer est ponctuel et la collaboration n'existera que pour la durée de l'intervention.

III.3.3.3 Persistance des cadres de mission initiaux

Dans le cas de la e-maintenance, les CD collaborant vont garder leur cadre de mission initial. Le besoin de collaborer est ponctuel et la collaboration ne durera que le temps de réaliser l'intervention.

Suite à la réalisation de l'intervention, le CDC est dissout et les CD ayant collaboré récupèrent leurs missions initiales.

III.3.3.4 Horizon et période

Les interventions correctives sur un équipement sont, par définition, des actions non prévues et non planifiées, à traiter rapidement. Elles sont réalisées en temps réel, ce qui correspond au niveau opérationnel du système décisionnel.

Ainsi, l'horizon décisionnel du CDC est le temps réel et la notion de période pour le CDC n'est pas applicable, le CDC est créé en fonction des besoins.

III.3.3.5 Types de regroupement

En fonction du besoin de collaboration, le CD origine va rechercher via les TIC et à l'aide de la cartographie des acteurs (cadre général) un CD lui permettant de compléter (partiellement ou totalement) ou de modifier :

- son cadre de mission :
 - . les variables de décision car le CD origine n'a pas le pouvoir de décider,
 - . les objectifs qui doivent être révisés de manière à être atteignables par le CDC,
 - . les contraintes que le CD origine ne peut respecter à son niveau décisionnel,
- son cadre de décision qui est actuellement insuffisant en termes de ressources immatérielles pour remettre l'équipement en état de fonctionner.

Cette recherche de CD peut suivre une procédure clairement établie par le cadre général ou en contactant les CD les plus proches dans le système décisionnel.

Dans ce contexte de collaboration via les TIC, les quatre types de collaboration (cf. paragraphe III.3.2.5) présentent des intérêts potentiellement différents. Nous les présentons par ordre de simplicité de mise en œuvre.

Le regroupement le plus simple est de type R_4 (CD parallèles) : le CD origine va dans un premier temps essayer d'améliorer son cadre de décision en intégrant à sa réflexion un CD de même niveau.

Le deuxième est de type R_3 (CD séries) : suite à l'échec de la précédente tentative, le CD origine va collaborer avec son CD amont, pour modifier les objectifs et les contraintes de son cadre de mission ou pour compléter son cadre de décision (expérience).

Le troisième regroupement engagé est de type R_2 : le CD origine va contacter un CD amont sans lien hiérarchique direct en vue d'améliorer son cadre de décision et / ou son cadre de mission.

Le dernier regroupement possible est de type R_1 : le CD va essayer de collaborer avec un CD amont appartenant à une autre organisation décisionnelle. Comme précédemment, les apports recherchés concernent le cadre de décision et / ou le cadre de mission.

Il est à noter que les derniers cas correspondent à la sous-traitance à un service spécialisé (R_2 - interne) ou à un fournisseur de service (R_1 - externe) de certaines activités de maintenance. Cette sous-traitance est soumise à un cadre général qui vise à établir clairement les rôles et missions mais, aussi, les degrés de liberté dont dispose le CD impliqué pour modifier le cadre de mission du CDC. Ainsi, le CD origine choisira de mettre en œuvre un regroupement de type R_1 ou R_2 en fonction des degrés de liberté cartographiés dans le cadre général.

III.3.4 Synthèse

Dans ce paragraphe, nous venons de détailler la création d'un Centre de Décision Collaboratif (CDC) à l'aide de centres de décision et de leurs caractéristiques. Afin d'obtenir une collaboration efficace et efficiente via les TIC, les éléments clés à considérer sont donc :

- le cadre général caractérisant les possibilités génériques de collaboration,

- l'origine et la nature du besoin origine de la collaboration : amont / aval, ponctuel / durable, couple H / P,...
- les éléments à modifier au niveau du cadre de mission et les manques du cadre de décision pour pouvoir mener à bien l'intervention,
- la cartographie des acteurs potentiellement disponibles via les TIC et leur domaine de compétence.

III.4 RESSOURCES IMMATÉRIELLES

Dans la démarche proposée au paragraphe précédent, les acteurs associés aux centres de décision peuvent être considérés comme des ressources matérielles (actionneurs de matériels de maintenance,...) et immatérielles (détenteurs de connaissances, et de compétences). Les acteurs de maintenance sont différenciables selon plusieurs critères : leur pouvoir décisionnel, leur rôle ou profil de mission, le type d'action de maintenance qu'ils réalisent,... mais également leur cadre de décision avec les ressources immatérielles qu'ils détiennent.

Nous allons étudier plus précisément les ressources immatérielles, en vue de leur dimensionnement et de l'évaluation des risques et impacts sur les décisions en cas d'indisponibilité de l'expertise nécessaire aux activités de e-maintenance. Ce paragraphe a pour objectif de caractériser les ressources immatérielles, en associant un aspect qualitatif et un aspect quantitatif.

III.4.1 Positionnement par rapport aux travaux existants

III.4.1.1 Définitions de base

Comme le définit l'approche systémique (présentée au paragraphe III.1.1.1 et illustrée sur la Figure III.1), une organisation est décomposée en trois sous-systèmes. Le système d'information est placé entre le système décisionnel et le système opérationnel de manière à fournir au système décisionnel les ressources immatérielles nécessaires aux décisions et au fonctionnement du système opérationnel.

Plusieurs notions assez proches sont associées aux ressources immatérielles et méritent d'être distinguées ; en voici les définitions.

La connaissance peut être définie comme un ensemble de représentations, idées ou perceptions acquises dans le cadre de formations et / ou par l'expérience [Afnor 02b].

Polanyi [Polanyi 66] distingue les connaissances tacites⁷, détenues par des acteurs, de celles explicites, formalisées sous diverses formes de stockage (papier, numérique,...), distinction reprise plus tard par [Nonaka 95].

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 de

⁷ Certains auteurs considèrent plutôt connaissance explicite / implicite mais cette dénomination reste marginale (celle issue de l'iceberg de la connaissance [Collins 92] : la partie visible correspond à la connaissance explicite, l'implicite étant immergée). La plupart des auteurs adoptent la dénomination tacite / explicite.

défaillances passées, des expériences de résolution de défaillances,... Tsuchiya se base sur la distinction classique donnée – information – connaissance pour définir une connaissance comme une information, environnée d'un contexte, sachant qu'une information peut être assimilée à une donnée interprétée [Tsuchiya 93]. Gardoni complète cette définition en indiquant que l'application, la mise en œuvre ou l'utilisation de connaissance peut être associée à la notion de compétence [Gardoni 99].

La compétence est une "aptitude démontrée à mettre en œuvre des connaissances et savoir-faire" [ISO 9001 00]. La norme AFNOR [Afnor 02b] 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" [Afnor 02b].

Ainsi, une compétence peut être associée à la mise en œuvre d'une connaissance, d'un savoir-faire ou d'un savoir-être.

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 à une activité, une mission, un processus,... [ISO 9001 00].

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.

III.4.1.2 Outils et techniques de modélisation existants

La littérature dans les domaines de la gestion des connaissances et des compétences est assez riche et offre divers outils et techniques de modélisation basés sur des modèles graphiques plus ou moins structurés.

Une organisation comme 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 98] :

- 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,...).

La caractérisation des ressources immatérielles nécessite l'utilisation d'une technique ou d'un modèle dédié à ce type de ressources. Nous présentons ici une synthèse des principaux travaux proposant une modélisation des ressources immatérielles.

III.4.1.2.1 En gestion des connaissances

Tout d'abord, il existe en gestion des connaissances des modèles plus ou moins élaborés qui vont de simples modèles statiques faisant un état des processus créant ou transformant des connaissances à des techniques de gestion des connaissances plus complexes.

Parmi les modèles statiques, citons, par exemple, le modèle de la marguerite [Ermine 96], le modèle des processus de création et de transformation des connaissances [Nonaka 94] et [Baumard 96] ou le cycle de vie des connaissances présenté notamment par Grundstein [Grundstein 95].

Néanmoins, ces modèles ne sont pas adaptés à nos attentes puisque nous souhaitons une représentation plus complète des ressources d'une organisation.

Des techniques plus élaborées permettent une gestion des connaissances à plus long terme, selon différentes approches :

- des méthodes formelles (mathématiques, physique, automatique,...) ou de Datamining (correspondant au terme français ECD : Extraction de Connaissances à partir de Données),
- des méthodes semi-formelles : approches objets, modèles relationnels issus des développements de bases de données, modèles fonctionnels du type SADT (Structured Analysis and Design Technic), BPM (Business Process Management ou gestion des processus métiers),...
- des méthodes dédiées, avec, par exemple :
 - . KADS (Knowledge Analysis and Design System) qui a évolué vers CommonKADS [Schreiber 94],
 - . MKSM (Methodology for Knowledge Management System) qui a évolué vers MASK (Method for Analysing and Structuring Knowledge) [Ermine 96],
 - . Cygma (CYcle de vie et Gestion des Métiers et Applications) [Dieng 00],
 - . la mémoire de projet [Dieng 98].

En complément de ces méthodes dédiées, des méthodes d'évaluation peuvent concerner les ressources immatérielles. Nous nous intéressons à l'évaluation stratégique de ces ressources, pour comprendre, évaluer et piloter l'organisation, avec des approches quantitative et / ou qualitative :

- la méthode Ic-dVAL (Intellectual Capital's Dynamic Value) [Bounfour 03], centrée sur l'évaluation dynamique du capital immatériel,
- les tableaux de bord prospectifs (Balanced Scorecards) [Kaplan 96],
- la méthode de surveillance des actifs immatériels (intangible assets monitor) [Sveiby 98],...

Chacune des méthodes que nous venons de citer a une cible très précise, assez limitée. Elles ne permettent pas une modélisation des ressources immatérielles intégrant les aspects quantitatifs et qualitatifs nécessaires pour avoir une vision complète de ces ressources et pouvoir les traiter convenablement. De plus, elles s'intéressent essentiellement aux connaissances, sans toujours prendre en compte les dimensions compétences, savoir-faire ou savoir-être.

III.4.1.2.2 En gestion des compétences

Le domaine de la gestion des compétences offre une couverture des ressources immatérielles plus grande en associant aux compétences plusieurs dimensions comme les connaissances, savoir-faire ou savoir-être.

La gestion opérationnelle des compétences est un courant de recherche qui se développe de plus en plus en lien avec l'intérêt marqué des entreprises pour leurs compétences. Ce courant de recherche se place au croisement de plusieurs disciplines, principalement les sciences humaines et sociales et la gestion industrielle.

La gestion opérationnelle des compétences s'appuie sur des modèles qui permettent de classer et d'identifier les compétences, définissant ainsi un outil de représentation et d'évaluation des compétences d'une organisation.

Voici une présentation des principaux modèles de compétences :

- le modèle de Jia qui différencie les compétences métier (qualification, polyvalence,...) et les compétences transversales (gestion, RH, innovation,...) en reliant tâche – compétence – acteur – activité [Jia 98],
- le modèle global cognitif de la compétence de [Bonjour 02] qui représente le processus de construction de la compétence à partir de ses constituants et de ses mécanismes de développement,
- le modèle CRAI (Competency Resource Aspect Individual) de [Harzallab 02] qui constitue un modèle global de la compétence, en différenciant compétences requises / compétences acquises par les acteurs et les savoir / savoir-faire / savoir-être,
- le modèle s-a-r-C (situation-acteur-ressources-Compétence) de [Boucher 03] qui est un modèle qualitatif de la compétence, réalisé à partir d'UML, en construisant les compétences avec les acteurs, la situation considérée et les ressources nécessaires,
- le modèle de Hermosillo qui est un modèle des compétences intégrant les notions de rôles et de connaissances, centré sur les processus de l'organisation [Hermosillo 05],
- le modèle systémique de la compétence de [Boumane 06], basé sur les concepts d'acteur, d'activité, de situation, de mission et de schème.

Les attentes des entreprises sont souvent bien plus concrètes, celles-ci souhaitant disposer d'un outil de gestion des ressources que sont leurs compétences, efficace et simple d'utilisation. Pour cela, il existe des référentiels des compétences opérationnelles ou des grilles de compétences. Leur construction permet une gestion quotidienne des compétences d'une entreprise. Citons, par exemple :

- le référentiel ROME (Répertoire Opérationnel des Métiers d'Entreprise) de l'ANPE (Agence Nationale Pour l'Emploi),
- la grille de compétences de [Harzallab 00] qui définit les tâches à réaliser et les compétences requises pour ces tâches et qui évalue les compétences acquises (disponibles par les acteurs),
- la matrice des compétences de Boumane [Boumane 06] qui permet une mise en relation des compétences et des activités,...

Une compétence peut également être associée à un niveau de maîtrise traduisant une aptitude à mettre en application une connaissance, un savoir-faire ou un savoir-être. Ces niveaux de maîtrise peuvent être construits sur des échelles diverses, par exemple, en quatre niveaux : ne sait pas faire (1), sait faire mais pas totalement (2), sait faire seul (3) et est expert (4).

III.4.1.2.3 Application à la maintenance et aux processus d'innovation

Ces méthodes de gestion des connaissances et des compétences ont été engagées dans des contextes applicatifs industriels. Citons, par exemple, les travaux de Longueville qui aborde la problématique des connaissances nécessaires aux prises de décision dans les projets d'innovation automobile [Longueville 03]. Dans ces travaux, l'auteur se concentre sur les outils informatiques supportant la gestion des connaissances, sans réellement aborder les enjeux organisationnels que les connaissances impliquent, préférant laisser les réorganisations des équipes projets aux spécialistes de la gestion des connaissances. Dans le domaine de la maintenance, la problématique de capitalisation et de réutilisation des connaissances et expériences est également présente. Les systèmes d'aide au diagnostic ayant pour but

de résoudre n'importe quelle défaillance, il leur est nécessaire de capitaliser et d'archiver les connaissances, compétences et autres ressources immatérielles que peuvent être les expériences. Rasovska propose une méthode basée sur le raisonnement à partir de cas pour capitaliser les connaissances de diagnostic et les expériences déjà réalisées, comme dans [Rasovska 05a] et [Rasovska 05b]. Les systèmes de retour d'expérience s'intéressent également aux connaissances [Clermont 07] avec des travaux comme ceux de Rakoto qui appliquent les techniques de retour d'expérience aux processus d'une entreprise [Rakoto 04]. Ces travaux nécessitent, au préalable, une formalisation de ces ressources, étape indispensable à la gestion des ressources immatérielles d'une organisation mais qui n'est pas toujours clairement exprimée car c'est une étape peu aisée.

Les processus d'explicitation de connaissances peuvent également se rapprocher de nos travaux car ils nécessitent une formalisation des connaissances explicitées. Citons les travaux de Pérès qui propose un processus d'élicitation d'experts permettant d'anticiper les défaillances et indisponibilité d'équipements de production [Pérès 05]. Ces travaux montrent toute la difficulté à exprimer et à récupérer les ressources détenues par des acteurs mais ne s'attardent pas sur les techniques de formalisation utilisées pour ces ressources.

III.4.2 Caractérisation des ressources immatérielles

Dans ce contexte, notre objectif est de proposer une caractérisation des ressources immatérielles (présentée dans [Segny 09]) afin de pouvoir manipuler et dimensionner ces ressources. Pour cela, nous nous appuyons sur des travaux existants dont nous allons légitimer les choix. Notre approche de caractérisation est, tout d'abord, une approche qualitative permettant de définir les attributs des ressources immatérielles manipulées en e-maintenance et de les inventorier. Nous associons à cette première étape de modélisation, une approche quantitative dont le but est de spécifier le dimensionnement global des ressources immatérielles.

III.4.2.1 Aspect qualitatif

Sur le plan qualitatif, la caractérisation des ressources immatérielles est basée 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.

Le survol de la littérature en gestion des connaissances et des compétences a montré une certaine diversité de méthodes, modèles ou référentiels permettant d'inventorier ces ressources. Nous avons choisi d'utiliser le modèle des compétences CRAI proposé par [Harzallah 02]. Ce modèle permet de cartographier les compétences et ses différentes composantes (connaissances, savoir-faire et savoir-être) et 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 et présentes au sein du service de maintenance, en intégrant les enjeux et les contraintes spécifiques au domaine de la maintenance (Figure III.15). Soulignons néanmoins la particularité de la relation entre compétence,

compétence requise et compétence acquise qui ne considère pas la propriété d'exclusivité de l'appartenance.

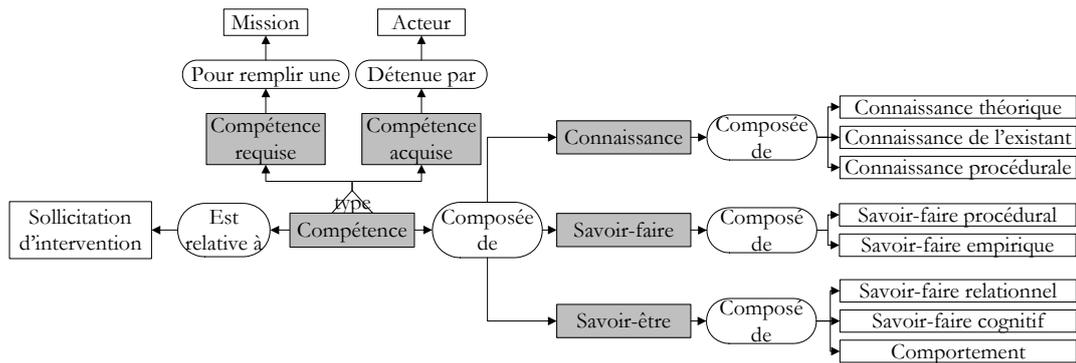


Figure III.15. Application du modèle de Harzallah dans notre contexte d'étude

À partir du modèle conceptuel de la Figure III.15, nous pouvons établir un diagramme de classes (Figure III.16), permettant de construire une modélisation 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 du chapitre II.

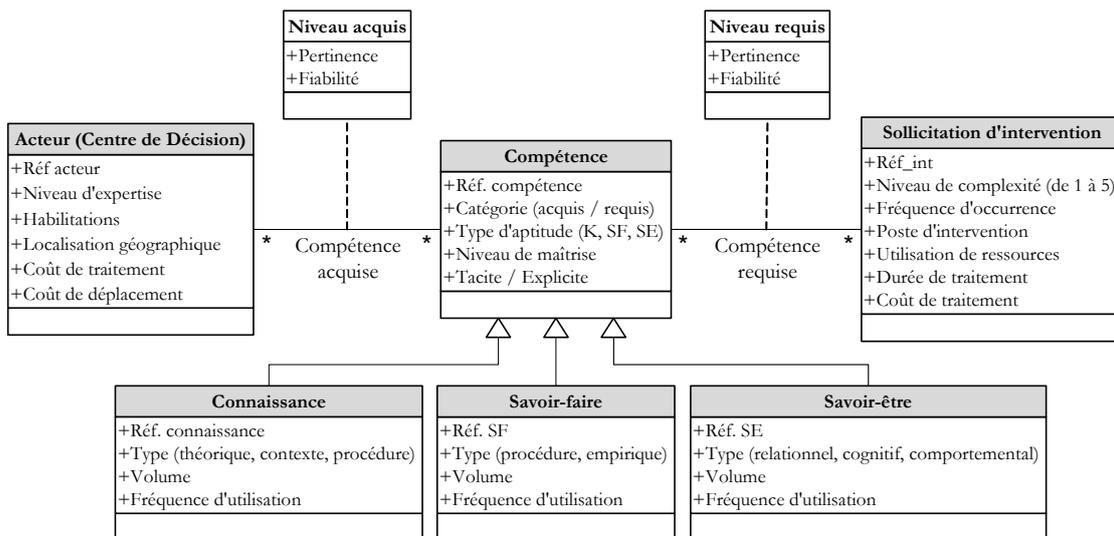


Figure III.16. Diagramme de classes des compétences de maintenance

Le modèle représenté sur la Figure III.16 est appliqué à notre domaine d'étude, caractérisant les compétences en fonction des sollicitations de maintenance (définissant la mission de maintenance fonction de la complexité de l'intervention, de l'équipement maintenu,...). Ce modèle permet de mettre en relation les compétences requises pour une mission de maintenance et les compétences acquises par les acteurs.

Ce modèle est complémentaire du diagramme de classes de la Figure II.10. 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 (référentiel informatif, acteur,...). Le modèle des compétences de la Figure III.16 décrit de manière plus détaillée la décomposition des compétences en fonction des connaissances, savoir-faire et savoir-être ; elles peuvent également être requises pour une sollicitation d'intervention ou acquises par les acteurs.

Certaines des caractéristiques décrites sont prépondérantes :

- fréquence d'utilisation : une connaissance fréquemment utilisée sera conservée 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,
- 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 de définir, de manière qualitative, les connaissances et compétences 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.

III.4.2.2 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 et dépendant de plusieurs facteurs :

- le domaine de l'étude de l'ensemble des connaissances étudiées,
- la nature, a priori, hétérogène des connaissances traitées,
- 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 III.4), inspirée des travaux de Merlo [Merlo 04].

Niveau de décomposition	Descriptif du niveau de connaissances
1 : KE	Connaissance élémentaire non décomposable
2 : KC	Connaissance composée de connaissances élémentaires
3 : KTR	transformation simple traduisant des relations élémentaires
4 : KIN	Instruction composée des niveaux précédents
5 : KPR	Procédure composée d'instructions
6 : KPG	Ensemble des connaissances du service de maintenance (programme)

Tableau III.4. Niveaux de décomposition des connaissances

Pour les compétences, la quantification 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. Nous pouvons ainsi définir quatre niveaux de quantification des compétences représentés dans le Tableau III.5.

Niveau de décomposition	Descriptif du niveau de compétences
1 : CE	Compétence élémentaire, non décomposable
2 : CC	Compétence composée de compétences élémentaires
3 : HA	Habilitation composée de compétences composées
4 : CPG	Ensemble des habilitations du service de maintenance

Tableau III.5. Niveaux de décomposition des compétences

Nous avons procédé à une décomposition similaire à celle des connaissances, sachant qu'il est possible de décomposer plus ou moins les connaissances et compétences et ainsi avoir un nombre de niveaux variable.

Un service de maintenance et les ressources immatérielles qui le composent deviennent ainsi caractérisables à l'aide de ces deux décompositions en niveaux, du niveau global du service de maintenance jusqu'à leur niveau élémentaire.

Pour un service de maintenance quelconque, il devient possible de quantifier les connaissances et les compétences par rapport aux différents niveaux de décomposition.

L'approche qualitative complète l'analyse quantitative en permettant de spécifier les attributs des ressources immatérielles du service de maintenance. Les caractéristiques des ressources immatérielles présentent un intérêt d'analyse essentiellement pour les premiers niveaux de décomposition (1 et 2) ; au-delà, leur caractérisation s'avère difficile car les ressources considérées sont trop agrégées.

Par la modélisation proposée, nous avons mis en évidence les caractéristiques des ressources immatérielles pouvant influencer sur la performance des activités de maintenance. Certaines des caractéristiques associées aux ressources immatérielles avaient déjà été identifiées au paragraphe II.4. Cette modélisation servira de point de départ à la répartition des ressources immatérielles de maintenance entre le mode local et le mode externalisé qui fait l'objet du chapitre IV. Cette répartition fait appel à un taux d'externalisation des ressources immatérielles qui est associé à un pourcentage de ressources immatérielles.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons considéré différents aspects de la décision collaborative.

Nous avons établi les principaux types de collaboration qu'on peut rencontrer dans les organisations industrielles, notamment en maintenance.

Nous avons étudié l'influence de la collaboration sur l'organisation d'un système de décision en proposant une analyse de la réorganisation de celui-ci sur la base d'un modèle générique permettant d'appréhender les regroupements consécutifs aux collaborations.

Nous nous sommes aussi intéressés à la modélisation des ressources immatérielles directement concernées par les mécanismes collaboratifs distinguant connaissances et compétences.

Dans le chapitre IV, nous allons nous appuyer sur ces éléments pour évaluer les performances de l'engagement des connaissances et des compétences nécessaires aux prises de décision en e-maintenance.



CHAPITRE IV. FORMULATION DES PERFORMANCES EN E-MAINTENANCE

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous proposons un cadre d'évaluation des performances de la distribution et de l'engagement des ressources immatérielles nécessaires aux prises de décision en e-maintenance. Notre objectif est d'évaluer la disponibilité des ressources immatérielles afin de déterminer la performance de traitement des interventions par un service de maintenance. Pour cela, nous nous appuyons sur la caractérisation des ressources immatérielles du chapitre III et sur l'étude des performances des activités de e-maintenance du chapitre II.

Après avoir établi une corrélation entre la performance des activités de e-maintenance et la disponibilité des ressources immatérielles requises, nous proposons une formulation de l'engagement des ressources immatérielles. Nous exprimons cet engagement sous forme statique et dynamique en fonction de plusieurs paramètres : la complexité de l'intervention, la disponibilité des acteurs et la répartition des ressources entre le mode local et le mode externalisé via le e-service.

Nous obtenons ainsi un dimensionnement global des ressources immatérielles du service de maintenance, avec une répartition des connaissances entre le mode local et le mode externalisé. Nous adoptons cette formulation comme base de simulation pour étudier diverses configurations de répartition et effectuer des choix stratégiques d'organisation du service de maintenance selon différents critères.

À partir de la formulation théorique de la performance, nous spécifions les conditions de simulation. Nous décrivons le principe de traitement des interventions après leur "déclenchement" (ordre d'intervention, détection de défaillances,...).

Une première modélisation par réseaux de Petri permet une formalisation du fonctionnement étudié.

Nous évaluons le traitement et le résultat de l'intervention à l'aide d'indicateurs de performance dans l'objectif de dégager les meilleures conditions pour assurer la performance des interventions de maintenance.

Nous considérons ensuite l'engagement d'un simulateur dédié, MKBS (Maintenance Knowledge-Based Simulation) que nous avons développé et qui est basé sur la modélisation objet. Nous avons aussi considéré à ce niveau une modélisation par système multiagents (plateforme MadKit) ; cette partie des travaux a été placée en annexe, en fin du mémoire.

IV.1 FORMULATION THÉORIQUE DES PERFORMANCES EN E-MAINTENANCE

Nous avons vu au paragraphe 1.2 que les TIC peuvent conduire à des modifications de l'instrumentation des activités de e-maintenance et provoquer également des changements organisationnels par redéploiement des ressources immatérielles.

Nous concentrons notre approche des performances en e-maintenance sur la disponibilité des ressources immatérielles nécessaires à la réalisation des activités de e-maintenance car elles ont un rôle prépondérant dans la résolution des interventions.

IV.1.1 Répartition des ressources nécessaires en e-maintenance

Par la modélisation processus (cf. paragraphe II.2) nous avons mis en évidence les supports dont la maintenance peut bénéficier : ressources matérielles et ressources immatérielles. Ces deux types de ressources peuvent être étendus, via le e-service, par un accès à des appuis délocalisés, distants du lieu d'intervention (Figure IV.1).

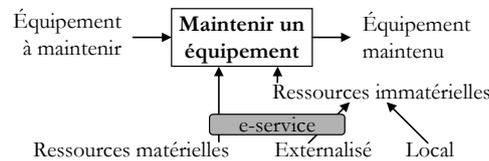


Figure IV.1. Répartition des ressources de e-maintenance

En effet, l'exploitation des TIC permet 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. Les TIC offrent plusieurs possibilités et peuvent agir tant au niveau des ressources matérielles qu'immatérielles :

- la consultation 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 01] avec, par exemple, la commande de pièces de rechange à distance, la réservation d'appareillage de mesure,...

Ainsi, en maintenance corrective, le e-service peut jouer un rôle essentiel dans la réalisation des différentes étapes du processus de maintenance (détection, diagnostic, réparation,... présentées au paragraphe II.2.4) par une aide à la surveillance et à la détection via des moyens de contrôle distribués ; en maintenance préventive, son rôle peut être étendu à toutes les étapes du processus préventif 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 [Aghbezraf 07], [Elegbede 03], [Fiori 06], [Ivanov 03]. Ces ressources ne font donc pas l'objet de nos travaux.

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 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.

REMARQUE. Les acteurs (opérateur, mainteneur, expert et responsable) interviennent 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).

IV.1.2 Performance et disponibilité des ressources immatérielles

L'importance des attentes du "client" parmi les contraintes auxquelles doit satisfaire l'entreprise n'est plus à démontrer. Le client souhaite obtenir ses produits dans les conditions initialement prévues par le cahier des charges. Le plus souvent, la fabrication de produits est dépendante des équipements de production de l'entreprise et de leur bon fonctionnement. Le fonctionnement des équipements et leur remise en état de fonctionner après défaillance dépendent directement des interventions de maintenance (leur durée, coût,...) et du résultat de ces interventions.

Ce résultat, reflet de la qualité de l'intervention, peut correspondre à quatre cas : non réparation de l'équipement, remise en état de fonctionnement dégradé, conforme ou bonifié.

À chaque type de résultat peut être associé un niveau de ressources immatérielles. Nous considérons qu'une remise en état de fonctionnement conforme nécessite un niveau "nominal" de connaissances et de compétences. Par référence, une indisponibilité partielle des connaissances et / ou des compétences conduira à un résultat dégradé et un résultat bonifié sera associé à un renforcement des connaissances et / ou compétences.

La qualité d'une intervention de maintenance est conditionnée par la bonne réalisation de la succession des étapes qui la composent, conduisant à la remise en fonctionnement de l'équipement maintenu. Ces étapes concernent la détection, le diagnostic, la réparation,... et, pour chacune, le bon déroulement dépend de la disponibilité des ressources immatérielles requises.

Une connaissance incomplète ou une compétence indisponible va entraîner une dégradation du résultat, voire son absence.

Ainsi, nous pouvons lier la performance des interventions de maintenance à la disponibilité des ressources immatérielles.

Dans nos travaux, nous allons nous intéresser principalement à toutes les phases "d'analyse" engagées dans les différentes étapes dont la réalisation dépend fortement des ressources immatérielles. Dans ces phases, le e-service permet de s'appuyer sur des ressources distantes, non présentes en local. Il est possible de "distribuer" les connaissances et compétences requises entre le domaine local et le domaine externalisé. Nous pouvons ainsi envisager de répartir les ressources immatérielles entre les acteurs de maintenance : opérateur et / ou mainteneur présent(s) en local et mainteneur et / ou expert délocalisé(s).

La performance d'une intervention de maintenance est directement corrélée au résultat de cette intervention mais aussi au mode de réalisation de chacune des étapes qui la constituent. Pour cela, trois aspects sont considérés mettant en jeu les objectifs visés, les moyens engagés et les résultats obtenus (Figure IV.2). 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 [Gibert 80].

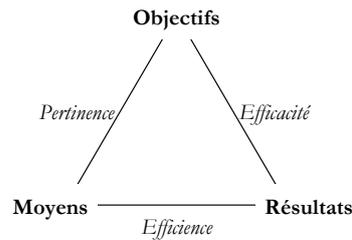


Figure IV.2. Caractéristiques de la performance

La notion d'efficacité peut être associée aux attentes du client : il souhaite la remise en fonctionnement des équipements. Celle 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 d'organiser et de dimensionner une structure en évitant un engagement de ressources inutiles avec des coûts injustifiés.

Dans la suite des travaux, ces différents aspects de l'évaluation de performance vont être considérés. Nous évaluerons l'efficacité du résultat de l'intervention à l'aide des indicateurs classiques de maintenance (MTBF, MUT,...) et l'efficience par le taux d'utilisation des ressources immatérielles. Pour évaluer les interventions de maintenance, nous allons nous appuyer sur le taux d'externalisation des ressources immatérielles et le taux d'échec des TIC, mis en évidence par la modélisation objet du chapitre II ; les indicateurs classiques (coût, durée et qualité) seront également considérés afin d'évaluer le déroulement de l'activité de e-maintenance.

IV.1.3 Démarche de répartition des ressources immatérielles

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à la répartition des connaissances (notées K) 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. Ces travaux ont été présentés dans [Noyes 07] et publiés dans [Seguy 09]. 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.

L'étude de la disponibilité des connaissances nécessite une formulation pratique de leur répartition entre le mode local et le mode externalisé. 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 (K_L) et celui des connaissances externalisées (K_E), accessibles via les fonctionnalités du e-service.

Le problème de répartition entre K_L et K_E ressemble par certains aspects à une extension de celui rencontré, en gestion de maintenance, pour l'application d'une démarche TPM (Total Productive Maintenance) sur un site industriel.

Dans la démarche TPM, il est attribué à l'opérateur qui conduit un équipement, une responsabilité d'entretien et de maintenance de premier niveau, correspondant à un transfert de la connaissance du

mainteneur vers l'opérateur. Ce transfert vise à donner plus d'autonomie à l'opérateur dans la maîtrise de son poste de travail [Thun 06].

Par les fonctionnalités du e-service, l'opérateur peut bénéficier des connaissances du mainteneur et le mainteneur peut, de manière similaire, disposer des connaissances d'experts, afin de faciliter ses interventions (et éviter le déplacement d'acteurs distants) (Figure IV.3).

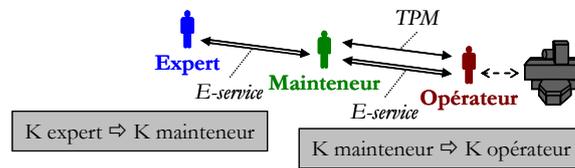


Figure IV.3. Extension de la TPM au e-service

Les connaissances nécessaires aux interventions peuvent être distribuées entre les deux cas extrêmes : ensemble des connaissances présent en local ou ensemble des connaissances externalisé (Figure IV.4).

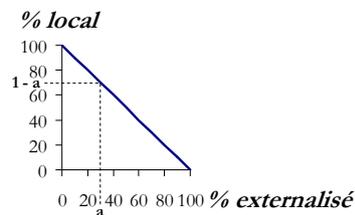


Figure IV.4. Problématique de répartition des connaissances

Diverses configurations de répartition sont possibles, distinguant chaque étape du processus de maintenance ou considérant globalement les connaissances du service de maintenance.

Nous illustrons sur le Tableau IV.1 les deux cas extrêmes (correspondant à 100% K_L en mode local et 100% K_E en mode externalisé) et deux cas mixtes. Dans les configurations mixtes, l'apport de connaissances externalisées peut être différemment réparti selon les étapes de maintenance considérées (les activités de diagnostic, par exemple, peuvent requérir un niveau élevé de connaissances détenues par un expert délocalisé).

Étapes de maintenance	ΣK locales	Mixte	ΣK Externalisées
Détection / alerte	↑		↑
Attente diagnostic		L ↓	
Diagnostic		↑ E ↓	
Attente action			
Action		L ↓	
Remise en cycle	↓		↓
	Cas A	Cas B	Cas C Cas N

Tableau IV.1. Différents cas de répartition des connaissances entre local et externalisé

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

$$K_T = K_{TL} + K_{TE} \quad (1)$$

avec : $K_{TE} = a * K_T \quad (2)$

$$K_{TL} = (1 - a) * K_T \quad (3)$$

a : taux de connaissances externalisées.

L'analyse des mécanismes décisionnels collaboratifs initiée au paragraphe III.2 nous a conduits à étudier différentes configurations de répartition. Une part importante de connaissances externalisées va mener à une décision externalisée, si l'acteur distant prend le pouvoir décisionnel ou multiacteur, si l'acteur distant et le mainteneur collaborent et construisent ensemble une décision avec leurs connaissances respectives. De même, lorsque la majorité des ressources est conservée en local, la décision pourra être collaborative si plusieurs acteurs contribuent à la décision.

Le problème de répartition des connaissances nécessaires peut être considéré :

- en statique, d'abord, en cherchant à établir le meilleur ratio K_L / K_E optimisant les indicateurs de coût, durée et qualité,
- en dynamique, ensuite, en étudiant les évolutions de cette répartition, en cas d'altération ou de perte du e-service ; celui-ci conditionnant l'accès aux connaissances externalisées, il faut trouver un équilibre entre la performance requise (et acquise via le e-service) et celle résiduelle en cas de défaillance de celui-ci. Cette approche mettra en évidence des risques de dépendance envers le e-service.

Nous allons considérer successivement ces deux situations.

IV.1.3.1 Approche statique

Nous formulons le problème de la répartition de connaissances entre K_{TL} (locales) 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 la résolution de ce type de problème et compte tenu de sa formulation, il pourra être utilisé des méthodes classiques de programmation linéaire utilisant les outils de base, tels ceux présentés dans [Bierlaire 07]. Des travaux appliqués à la maintenance, comme ceux de [Kaffel 03] et [Fiori 06], peuvent également être pris en exemple.

Nous avons déjà évoqué que la performance des activités de e-maintenance peut être corrélée au résultat de l'intervention et au déroulement des étapes qui la composent.

Nous allons donc aborder la performance des activités de e-maintenance à deux niveaux :

- celui global du système de maintenance, en considérant la totalité des connaissances K_T composant le service de maintenance géré par le responsable de service,
- celui d'une intervention particulière I , en prenant en compte les connaissances nominales K_N nécessaires pour celle-ci ($K_N \subset K_T$).

Nous avons identifié plusieurs facteurs agissant sur les activités de maintenance :

- le niveau de complexité de l'intervention, selon la classification des connaissances nécessaires à l'intervention définie au paragraphe I.1.1.1.3 avec les cinq niveaux de maintenance AFNOR [Afnor 02],
- la répartition géographique entre le mode local et le mode externalisé,
- la distribution entre les acteurs concernés,
- la disponibilité des acteurs.

IV.1.3.1.1 Décomposition des connaissances selon les niveaux de maintenance

Une intervention de maintenance peut être spécifiée par son niveau de complexité classé dans l'un des cinq niveaux de maintenance AFNOR. La connaissance totale disponible dans un service de maintenance K_T correspond à la totalité des connaissances des cinq niveaux de maintenance :

$$K_T = K_{T1} + K_{T2} + K_{T3} + K_{T4} + K_{T5}, \text{ soit : } K_T = \sum_{i=1}^5 K_{Ti} \quad (4)$$

REMARQUE. 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 fréquemment 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 (cf. paragraphe III.4), 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} :

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

$$K_{TE} = \sum_{i=1}^5 a_i * K_{Ti} \quad (6)$$

avec : $1 \leq i \leq 5$, niveau de connaissances selon les cinq niveaux de maintenance,
 K_{Ti} : connaissance totale de niveau i ,
 K_{TL} : connaissance totale locale,
 K_{TE} : connaissance totale externalisée,
 a_i : taux de connaissances K_{Ti} externalisées⁸.

⁸ $a_i=0$ signifie que la connaissance de niveau i est instanciée à 100% en local.

REMARQUE. 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'action 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} :

$$C_T = c_L * K_{TL} + c_E * K_{TE} \quad (7)$$

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} :

$$D_T = d_L * K_{TL} + d_E * K_{TE} \quad (8)$$

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.

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 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 :

$$C_T = \sum_{i=1}^5 K_{Ti} * [c_{Li} * (1 - a_i) + c_{Ei} * a_i] \quad (9)$$

$$D_T = \sum_{i=1}^5 K_{Ti} * [d_{Li} * (1 - a_i) + d_{Ei} * a_i] \quad (10)$$

avec : $1 \leq i \leq 5$, niveau de connaissances selon les cinq niveaux de maintenance,

K_{Ti} : connaissance totale de niveau i ,

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,

a_i : taux de connaissances K_{Ti} 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.

La démarche suivie peut être transposée à l'analyse des connaissances nominales engagées pour une intervention I (K_N). Nous considérons que les connaissances nominales K_N nécessaires pour une intervention particulière I représentent une partie de K_T . La corrélation entre les connaissances nominales et la connaissance totale du service (K_T) peut être exprimée par l'expression (11) :

$$K_N = u_T * K_T \tag{11}$$

avec : K_N : connaissances nominales requises pour une intervention donnée,
 K_T : connaissance totale du service de maintenance,
 u_T : taux d'utilisation de la connaissance totale K_T ($u_T \leq 1$).

Si on considère les niveaux de connaissances :

$$K_{Ni} = \sum_{i=1}^5 u_{Ti} * K_{Ti} \tag{12}$$

avec : K_{Ni} : connaissances nominales requises pour une intervention donnée de niveau i ,
 K_{Ti} : connaissance totale de niveau i ,
 u_{Ti} : taux d'utilisation de la connaissance totale K_{Ti} .

IV.1.3.1.2 Décomposition des connaissances entre les acteurs de maintenance

Nous illustrons sur la Figure IV.5 une répartition entre K_{Ni} (connaissances nominales requises pour une intervention donnée) et K_{Act} (connaissances détenues par les acteurs de maintenance).

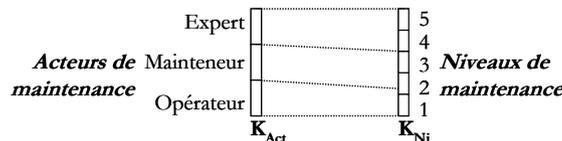


Figure IV.5. Exemple d'affectation des connaissances des acteurs

Cet exemple fait apparaître une distribution des connaissances selon les niveaux de maintenance entre les trois types d'acteurs intervenant en maintenance : opérateur, mainteneur et expert pouvant être exprimée par les taux d'affectation du Tableau IV.2.

Acteurs \ Connaissances	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
1-Opérateur	X ₁₁	X ₁₂			
2-Mainteneur		X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	
3-Expert				X ₃₄	X ₃₅

avec X_{ji} : taux d'affectation pour lequel j : acteur et i : niveau de connaissances.

Tableau IV.2. Exemple de répartition des connaissances entre les acteurs de maintenance

Grâce aux outils TIC, l'opérateur peut accéder à des connaissances de niveau 2 (par exemple, des bases de données délocalisées). Le mainteneur détient des connaissances de niveau 2, 3 et 4. L'expert complète l'affectation avec les niveaux 4 et 5.

Cette affectation peut être synthétisée sous la forme suivante :

$$K_T = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^5 X_{ji} * K_{Ti} \quad (13)$$

IV.1.3.1.3 Bilan sur l'expression de la répartition des connaissances

Nous résumons dans le [Tableau IV.3](#) les différentes expressions de la connaissance totale K_T et celle nominale pour une intervention K_N , déduites des modes de répartition possibles examinés dans les paragraphes précédents, en prenant appui sur les différents facteurs qui peuvent influencer sur la disponibilité de cette connaissance.

Type de répartition	Connaissance totale K_T	Connaissance nominale pour une intervention K_N
Local / Externalisé	$K_T = f_1(K_{TL}, K_{TE})$ (1), (2), (3)	$K_N = f_2(K_{NL}, K_{NE})$
Par niveau de maintenance	$K_T = g_1\left(\sum_{i=1}^5 K_{Ti}\right)$ (4), (5), (6)	$K_N = g_2\left(\sum_{i=1}^5 K_{Ni}\right)$
Par acteur de maintenance	$K_T = h_1\left(\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^5 X_{ji} * K_{Ti}\right)$ (13)	$K_N = h_2\left(\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^5 X_{ji} * K_{Ni}\right)$
Relation entre K_T et K_N : $K_N = h(K_T)$ (11), (12)		

Tableau IV.3. Récapitulatif de la répartition des connaissances de maintenance

D'autres expressions de K_T et K_N 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}) :

$$C_T \leq C_{\max} \quad (14)$$

$$D_T \leq D_{\max} \quad (15)$$

avec : C_T et D_T définis respectivement par les expressions (9) et (10) 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 au niveau de la répartition entre le mode local et le mode externalisé et 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 connaissances engagées par rapport à un niveau nominal, c'est-à-dire le niveau de connaissances nécessaires pour remettre un équipement dans un état de fonctionnement conforme. Parmi les quatre cas de remise en fonctionnement évoqués au paragraphe IV.1.2, le niveau nominal de connaissances 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 connaissances supérieur au niveau nominal.

IV.1.3.2 Approche dynamique

Comme tout système bénéficiant d'appuis externalisés, 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_N) pour une intervention I, celles-ci peuvent être exprimées suivant :

$$K_N = K_{NL} + K_{NE} \quad (16)$$

avec : K_N : connaissances nominales requises pour une intervention donnée,

K_{NE} : connaissances nominales externalisées : $K_{NE} = a * K_N$,

K_{NL} : connaissances nominales en local : $K_{NL} = (1-a) * K_N$,

a : taux de connaissances externalisées ($0 \leq a \leq 1$).

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

$$K_{eff} = K_{NL} + (1-x) * K_{NE} \quad (17)$$

$$K_{eff} = (1-a) * K_N + (1-x) * a * K_N \quad (18)$$

$$\text{soit : } K_{eff} = K_N * (1-a * x) \quad (19)$$

Par cette formulation, nous pouvons construire des abaques relatives à l'évolution des connaissances totales, externalisées ou locales. Ces abaques permettent d'effectuer un premier dimensionnement global de l'engagement des connaissances pour une intervention I donnée. Par extension, en considérant l'ensemble des interventions devant être réalisées durant une période donnée, il devient

possible de dimensionner un service de maintenance. Les connaissances étant corrélées à la performance, nous pourrions ainsi évaluer la performance d'une intervention ou de la fonction maintenance.

Nous pouvons déduire de l'équation (19) la courbe d'évolution de la performance effective illustrée sur la Figure IV.6. Cette courbe correspond à l'évolution des connaissances effectives K_{eff} en fonction de x , pour K_N donnée et différentes valeurs de a .

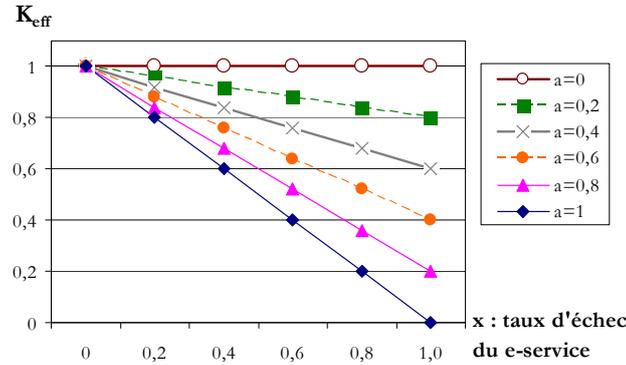


Figure IV.6. Évolution du taux de connaissances effectives

Les tracés lient directement la performance effective au taux de connaissances externalisées et au taux d'échec du e-service. Nous pouvons ainsi aborder les problèmes de localisation / délocalisation des connaissances en termes de taux d'interventions résolues. Ce taux d'interventions résolues peut être interprété comme l'aptitude du service de maintenance à réaliser les interventions et, donc, comme la performance de fonctionnement des équipements maintenus.

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 ne faut pas dépasser le taux d'externalisation de 20% ($a=0,2$), au-delà, la performance ne sera plus garantie.

Bien sûr, il s'agit là d'une "lecture" essentiellement quantitative qui ne considère pas le caractère "qualitatif" de la connaissance concernée (cf. paragraphe III.4.2). L'absence d'une seule connaissance cruciale (critique) peut suffire à faire échouer l'intervention.

En reprenant l'équation (18), nous pouvons distinguer la part de connaissances locales (K_{effL}) de celles externalisées (K_{effE}). Nous pouvons ainsi représenter l'évolution du taux d'utilisation des connaissances présentes en local (Figure IV.7a) à partir de l'expression (20) de T_{effL} .

$$T_{effL} = \frac{K_{effL}}{K_{eff}} = \frac{1-a}{1-a*x} \quad (20)$$

De manière similaire, nous pouvons représenter l'évolution du taux d'utilisation des connaissances externalisées, accessibles via le e-service (Figure IV.7b) à partir de l'expression (21) de T_{effE} .

$$T_{effE} = \frac{(1-x)*a}{1-a*x} \quad (21)$$

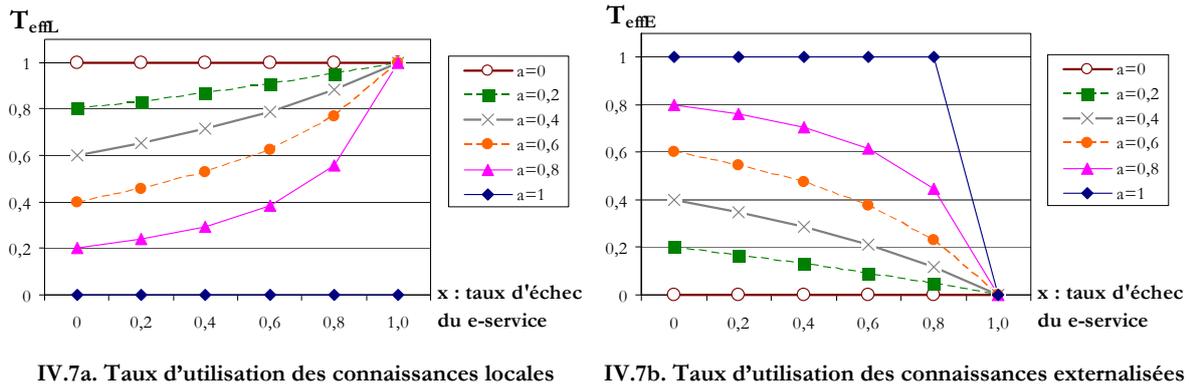


Figure IV.7. Évolution du taux d'utilisation des connaissances locales et externalisées

Les tracés de la Figure IV.7 correspondent à des valeurs moyennes (taux moyens d'utilisation des connaissances locales et celles externalisées) qui, évidemment, montrent que la décision sous-jacente est de plus en plus tributaire du e-service lorsque le taux de connaissances externalisées (a) augmente.

Dans ce paragraphe, nous avons présenté une formulation de la répartition des connaissances nécessaires en e-maintenance. L'analyse dynamique a permis d'intégrer le risque de défaillance du e-service qui entraîne une indisponibilité des connaissances externalisées et une dégradation des performances du service de maintenance ou de l'intervention.

IV.2 PRINCIPES DE SIMULATION

La formulation des performances proposée au paragraphe IV.1 permet de comparer les performances de scénarios de e-maintenance. À partir de cette formulation, nous avons conçu un outil de simulation de scénarios de e-maintenance permettant de comparer les performances de différentes stratégies d'organisation du service de maintenance et de répartitions des connaissances.

Nous allons tout d'abord spécifier le principe de traitement des simulations des performances en e-maintenance. Ensuite, nous confronterons plusieurs techniques et formalismes de simulation complémentaires utilisés lors de nos développements.

Ce type d'analyse doit permettre de paramétrer plusieurs stratégies de déploiement des connaissances et d'en quantifier les performances. L'objectif est de développer un outil d'évaluation des performances de scénarios de e-maintenance avec une répartition paramétrable des connaissances. Pour appréhender des situations réalistes, nous avons défini les critères suivants :

- le taux de répartition des connaissances entre les catégories d'acteurs et les référentiels (papier, base de données),
- la capacité de traitement de chaque catégorie d'acteur seul, avec un apport de connaissances explicites et avec l'aide d'une autre catégorie,
- le nombre d'interventions générées et devant être traitées simultanément par le service de maintenance,
- le niveau de connaissances de 1 à 5 en fonction du niveau de complexité des interventions,
- la localisation des connaissances (mode local ou mode externalisé),
- la disponibilité des acteurs et du réseau.

La simulation de scénarios de e-maintenance est initiée par l'occurrence d'une sollicitation (ordre d'intervention, apparition d'une défaillance, donnée calendaire,...). La génération de ces sollicitations peut être réalisée via une fréquence d'occurrence ou un taux de défaillance. À chaque sollicitation peut être associé un niveau de complexité selon les niveaux de maintenance AFNOR [Afnor 02] définis au paragraphe I.1.1.1.3.

Le traitement des interventions nécessite l'utilisation de connaissances, réparties entre le mode local (traitement en local, auprès de l'équipement à maintenir) et le mode externalisé (traitement faisant appel à des acteurs ou des connaissances externalisés, distants de l'équipement). La référence considérée pour déterminer le mode local est l'équipement à maintenir.

IV.2.1 Composants des simulations

La simulation s'appuie sur la description des scénarios présentée au paragraphe II.3. Ainsi, nous retrouvons les composants suivants :

- les sollicitations d'intervention,
- les acteurs intervenant lors des activités de e-maintenance, répartis en trois catégories : opérateur de production, mainteneur et expert,
- les outils basés sur les technologies TIC : instrumentation et réseau,
- les équipements à maintenir,
- les procédures et manuels papier,
- les bases de données informatiques,
- les appareillages et les outillages.

Ces composants sont organisés comme décrit lors de la modélisation UML (cf. paragraphe II.3.2.2). Les diagrammes UML statiques et dynamiques ont constitué la spécification de base pour la structure et l'organisation de la simulation.

IV.2.2 Règles de déroulement des simulations

En complément des spécifications UML, nous définissons des règles décrivant le déroulement des simulations.

IV.2.2.1 Traitement des interventions par les catégories d'acteurs

Dans chaque catégorie, il existe plusieurs acteurs. Pour simplifier l'analyse, nous avons considéré que dans une même catégorie, tous les acteurs avaient le même niveau de connaissances, avec quelques variations possibles.

Le traitement d'une sollicitation est représenté sur la [Figure IV.8](#).

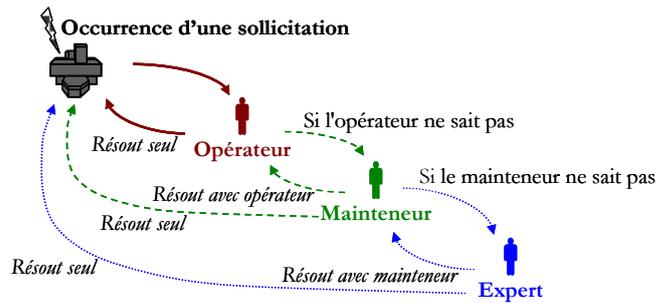


Figure IV.8. Traitement d'une sollicitation par les trois catégories d'acteurs

Pour l'attribution de l'intervention, la sollicitation est envoyée à l'opérateur, puisqu'il est l'acteur le plus proche de l'équipement à maintenir. Selon le niveau de complexité correspondant, l'opérateur peut ou non traiter l'intervention. Si l'opérateur ne sait pas traiter, il sollicite le mainteneur qui a un niveau de connaissances supérieur. De même, si le mainteneur ne sait pas résoudre l'intervention, il transmet la sollicitation à l'expert.

Dans le présent scénario, nous considérons que l'expert sait traiter l'intervention (dans le cas contraire, il faudrait prendre en compte le retour en usine pour le niveau de complexité maximal).

Plusieurs situations sont également possibles pour la réalisation pratique de l'action, selon l'attribution de l'intervention :

- si la sollicitation est restée au niveau de l'opérateur (sait traiter), celui-ci réalise seul l'intervention,
- si la sollicitation a été transmise au niveau du mainteneur et si celui-ci sait le traiter, il va réaliser l'intervention seul ou avec l'opérateur, soit à distance, soit après s'être déplacé,
- si la sollicitation a été transmise au niveau de l'expert, celui-ci va réaliser l'intervention seul, avec le mainteneur (si c'est le mainteneur qui lui a transmis la sollicitation et s'il est disponible) ou avec l'opérateur (si le mainteneur n'est pas disponible), soit à distance, soit après s'être déplacé.

Ainsi, indépendamment des apports de connaissances via les TIC, la réalisation physique d'une intervention peut donner lieu à des déplacements sur site ou à de la télémaintenance.

IV.2.2.2 Caractéristiques des catégories d'acteurs

Une analyse détaillée de chaque catégorie d'acteur nous conduit à préciser le fonctionnement de chaque acteur en intégrant sa disponibilité et l'augmentation de son cadre de décision via les TIC.

IV.2.2.2.1 Fonctionnement interne des acteurs

Chaque catégorie est composée d'acteurs ayant les mêmes caractéristiques en termes de connaissances, de capacité à communiquer avec les autres acteurs, et de disponibilité. Les quatre traitements associés à un acteur sont représentés sur la Figure IV.9.

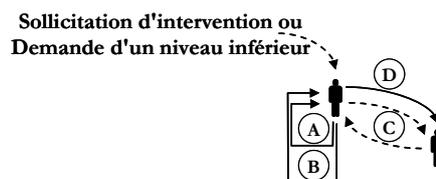


Figure IV.9. Schéma de principe du fonctionnement d'un acteur

Chaque acteur, noté A_i est associé à quatre cas de traitement possibles :

- A : l'acteur peut traiter seul avec ses propres connaissances ou en consultant une procédure adaptée disponible sous format papier en local,
- B : l'acteur ne possède pas l'ensemble des connaissances requises mais peut consulter les connaissances qui lui manquent dans une base de données disponibles via l'instrumentation et le réseau TIC,
- C : l'acteur ne réunit pas l'ensemble des connaissances requises et peut bénéficier de l'aide à distance de l'acteur A_{i+1} accessible via les TIC pour compléter ses connaissances,
- D : l'acteur n'a pas les connaissances requises et transmet la sollicitation d'intervention à l'acteur A_{i+1} (besoin des TIC) pour réaliser l'intervention.

Les traitements C et D entraînent la collaboration des acteurs A_i et A_{i+1} . Les cas B et C représentent une décision locale avec apport de connaissances externalisées (explicites dans le cas B et tacites dans le cas C). Le cas D correspond à une décision externalisée pour l'acteur A_i , qui devient locale pour l'acteur A_{i+1} .

IV.2.2.2 Indisponibilité des acteurs

Afin d'effectuer des simulations réalistes, nous prenons en compte le risque d'indisponibilité des acteurs. Un acteur est indisponible s'il est déjà en train de réaliser une autre intervention ou s'il est absent de son poste.

Lorsque l'acteur sollicité est indisponible, nous avons considéré les cas suivants :

- s'il existe d'autres acteurs dans la même catégorie (ayant le même niveau de connaissances), contacter un de ces acteurs,
- s'il n'existe pas d'autre acteur dans la catégorie considérée, attendre un certain temps limité et recontacter l'acteur,
- si aucun acteur de la catégorie n'est disponible au-delà de la durée limite d'attente (à fixer), contacter un acteur de la catégorie supérieure,
- pour la catégorie d'expert (pas de passage possible à la catégorie supérieure), attendre qu'un des acteurs de la catégorie soit disponible ou intégrer un mode de traitement dégradé avec une catégorie d'acteur inférieure.

Si un acteur d'une catégorie n'a pas la connaissance pour traiter l'intervention, nous considérons qu'il en est de même pour tous les acteurs de cette catégorie (même niveau de connaissances) et les acteurs de la catégorie supérieure sont alors sollicités.

IV.2.2.3 Utilisation des TIC

Les outils issus des technologies TIC (instrumentation des acteurs et réseau) sont nécessaires à la réalisation des interventions dans la plupart des traitements (excepté le cas A). Les TIC doivent être en état de fonctionner (non défectueuses) pour permettre :

- la consultation de bases de données (apports de connaissances explicites),
- les apports de connaissances externalisées provenant d'acteurs (apports tacites),
- l'externalisation de la décision,
- la réalisation d'interventions à distance.

IV.2.2.4 Fonctionnement

Le détail de fonctionnement d'une catégorie d'acteur est présenté sur la [Figure IV.10](#).

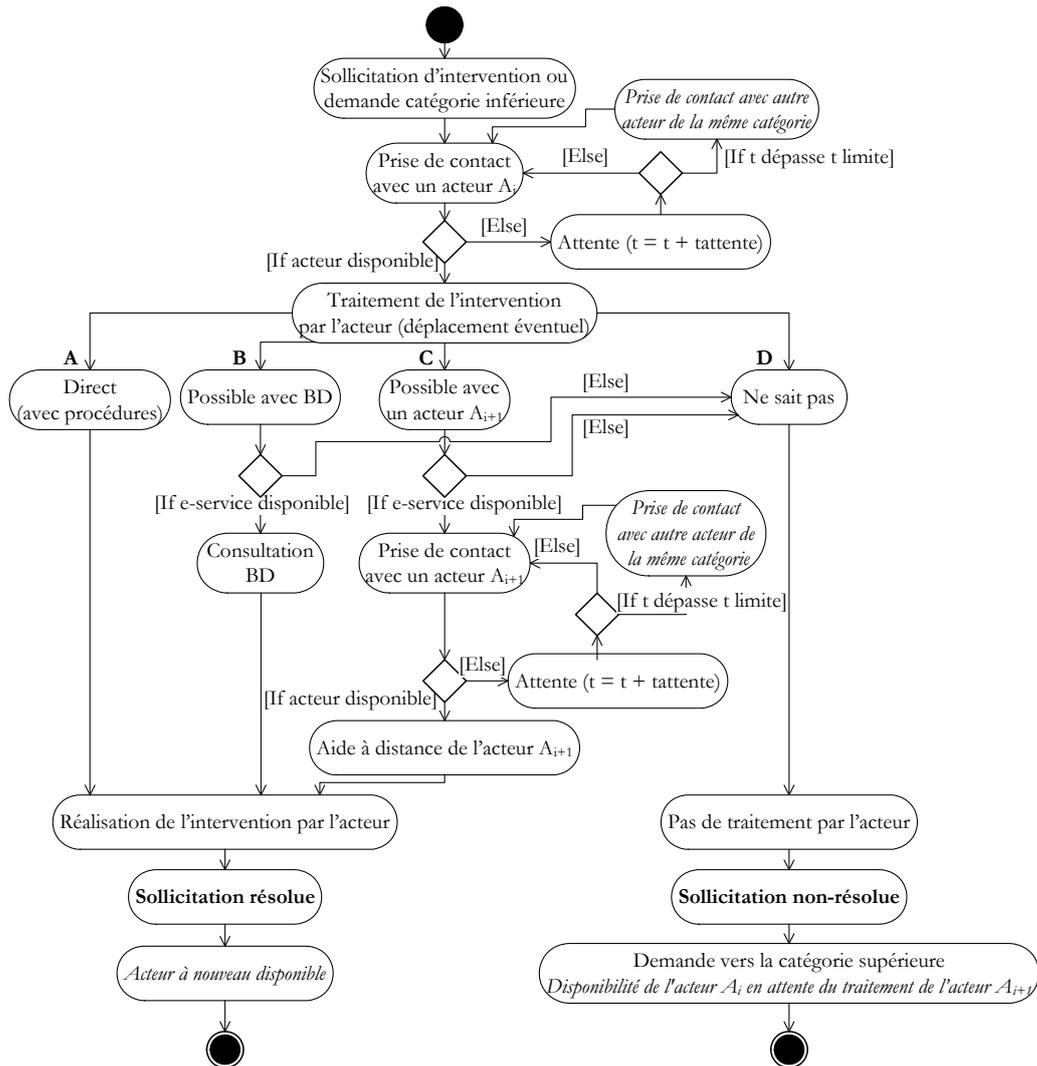


Figure IV.10. Diagramme d'activités UML d'une catégorie d'acteur

Sur la Figure IV.10, nous décrivons le processus de traitement d'une intervention par un seul acteur. Nous retrouvons les différents traitements réalisables par un acteur : seul (A), en consultant une base de données (B), en demandant de l'aide à un acteur de catégorie supérieure (C) ou en délocalisant l'intervention à traiter à l'acteur de catégorie supérieure (D).

Pour une situation considérant trois catégories d'acteurs, cet algorithme est répété sur trois niveaux. C'est par le cas de traitement D d'un acteur A_i que débutera l'algorithme de l'acteur A_{i+1} .

L'implémentation de cet algorithme nous a permis de simuler les différentes configurations envisageables pour l'organisation d'un service de maintenance et d'établir un ensemble de résultats concernant le déroulement de l'intervention et l'engagement des acteurs, afin d'évaluer la performance de réalisation de chaque intervention et celle globale du service. Cette performance peut être évaluée à l'aide d'indicateurs comme, par exemple, la durée d'intervention ou les connaissances effectivement disponibles pour la réalisation de chaque intervention.

IV.2.3 Formalismes retenus pour la simulation

La simulation de scénarios de e-maintenance a suivi les principes et règles de simulation (définis aux paragraphes [IV.2.1](#) et [IV.2.2](#)) en utilisant des techniques de modélisation existantes. La simulation que nous proposons s'appuie sur le principe de répartition des connaissances présenté au paragraphe [IV.1.3](#). Nous avons retenu deux approches de simulation : les réseaux de Petri (RdP), au titre d'outil de simulation générique, et la simulation dédiée à partir des programmations agent et objet.

Avec les réseaux de Petri, nous définissons les bases de la modélisation de scénarios de e-maintenance afin de simuler et d'évaluer l'impact des principaux composants des situations considérées. L'engagement des modèles permet un dimensionnement global des connaissances et de leur répartition afin d'améliorer le déroulement des scénarios de e-maintenance.

Nous complétons cette première modélisation par une simulation dédiée. Nous développons en parallèle deux approches de programmation : les objets et les systèmes multiagents (SMA).

Le premier simulateur, basé sur la programmation objet (concept proche de celui des agents) est appelé MKBS ("Maintenance Knowledge-Based Simulation").

Le deuxième simulateur est basé sur le développement d'un système multiagents (SMA) et permet de modéliser la collaboration et les échanges entre acteurs (ce simulateur sera présenté en [ANNEXE](#)).

IV.2.4 Compléments bibliographiques

Nous complétons l'état de l'art initial par l'analyse des travaux de recherche menés sur les pistes de simulation retenues.

Les réseaux de Petri (RdP) ont été initiés par Carl Adam Petri en 1962 [[Petri 62](#)]. Ils ont été développés pendant une dizaine d'années pour intégrer les réseaux temporisés, stochastiques, colorés,... Les réseaux de Petri constituent une modélisation formelle de systèmes, de leurs comportements,... permettant de nombreux paramétrages et exploitations [[Brams 83](#)].

Dans la littérature, nombreux sont les travaux de recherche qui s'appuient sur cet outil de modélisation pour modéliser des mécanismes complexes comme, par exemple, les processus de collaboration et de prise de décision. Citons les travaux de Le Quéré où les réseaux de Petri sont utilisés pour modéliser les processus de décision en maintenance [[Le Quéré 03](#)]. Il y a également les travaux de Monteiro où les réseaux de Petri permettent de modéliser les processus de production et étudier la coopération et les prises de décision dans les chaînes logistiques [[Monteiro 07](#)]. Cependant, ces travaux n'offrent que des modélisations partielles des enjeux décisionnel et collaboratif, sans permettre une meilleure analyse des enjeux concernés.

Les réseaux de Petri sont associés à d'autres techniques de modélisation : UML que nous avons utilisé dans le chapitre II et les SMA qui complètent les RdP.

Eichner propose une méthodologie permettant d'étendre les diagrammes de séquence UML à l'aide des concepts des réseaux de Petri [[Eichner 05](#)]. Tararykine va plus loin puisqu'il associe une modélisation UML des flux d'information de solutions de e-maintenance à des réseaux de Petri lui permettant de décrire le fonctionnement interne des acteurs de maintenance [[Tararykine 05](#)]. Les travaux de Tararykine suivent une démarche semblable à la nôtre, même si son utilisation des réseaux de Petri se positionne à un niveau trop microscopique par rapport à nos besoins.

Les travaux associant les RdP et les SMA sont également nombreux. Citons, les travaux de Combes où un SMA est spécifié à l'aide de RdP [[Combes 98](#)]. Saint Voirin combine les deux modélisations RdP et

SMA pour proposer une modélisation des interactions entre acteurs d'un système coopératif de e-maintenance [St Voirin 06]. Kwon propose de développer un système intelligent pour faciliter l'intégration et l'adaptation des ERP (Enterprise Resource Planning) à leur environnement et aux contraintes évolutives des entreprises [Kwon 01]; ces travaux se concentrent sur la maintenance en proposant un système intelligent couplant SMA et réseaux de Petri. Même Ferber, l'un des "experts" des SMA évoque les réseaux de Petri pour spécifier les communications et interactions entre agents [Ferber 95].

Ces travaux montrent bien l'intérêt d'associer réseaux de Petri et SMA, leur complémentarité entre une modélisation formelle des comportements internes des agents ou des spécifications de la communication entre agents.

Nous venons de montrer l'intérêt de combiner réseaux de Petri et SMA. Les SMA offrent un outil de modélisation, mais surtout de simulation de systèmes pouvant être complexes, en intégrant les possibilités de collaborer, d'échanger, de travailler à distance,...

Les bases des SMA ont été posées par Ferber, qui a spécifié les principaux concepts et règles de fonctionnement des SMA dans [Ferber 95].

Les SMA se répandent de plus en plus dans les domaines de l'aide à la décision et à la collaboration.

En aide à la décision, nous trouvons les travaux de Marzi et de Yu. Marzi propose une architecture SMA pour aider les prises de décision lors de l'élaboration de diagnostic [Marzi 02]. Yu propose également un système multiagents dans le domaine de la maintenance [Yu 03]; il s'agit d'un système d'aide à la décision plus complet que celui de Marzi intégré à une plateforme de e-maintenance.

En aide à la collaboration, nous trouvons les travaux d'Adam et de Panzarasa. Adam propose une modélisation par SMA pour aider au travail collaboratif des systèmes administratifs complexes [Adam 00]. Panzarasa propose une approche différente, plus cognitive puisqu'il s'intéresse à la formalisation des mécanismes complexes de prise de décision collaborative, de la représentation mentale des décideurs et de leur raisonnement [Panzarasa 02].

Nous avons également remarqué les travaux de Benaouda où les auteurs développent une simulation multiagents pour aider à la gestion des ressources matérielles dans le cadre de systèmes multisites [Benaouda 06].

Les développements de simulateurs dédiés sont nombreux. L'actualité des travaux les concernant montre les nombreux choix d'utilisation des SMA. Nous allons nous aider de ces développements pour nos travaux à partir des SMA et de la programmation objet.

IV.3 MODÉLISATION PAR RÉSEAUX DE PETRI

IV.3.1 Élaboration du modèle RdP

Pour développer un modèle RdP de scénarios de e-maintenance et établir des modèles intégrant les spécificités des systèmes réels, nous nous appuyons sur les propriétés des RdP temporisés stochastiques [Natkin 80] [Molloy 82].

Ce choix des RdP stochastiques nous permettra de paramétrer les modèles avec des lois événementielles stochastiques pour le franchissement des transitions et d'établir des mesures de performance des activités de e-maintenance liées au temps.

En utilisant les RdP, notre objectif est de proposer une modélisation formelle des scénarios de e-maintenance mettant en évidence l'utilisation des TIC et permettant d'évaluer leurs performances.

Les modèles que nous construisons s'appuient sur les principes du paragraphe IV.2 où nous avons spécifié le déroulement des scénarios et les conditions de traitement des interventions. Les ressources nécessaires au traitement des sollicitations sont les acteurs intervenant en maintenance et les outils issus des TIC. Ces ressources peuvent être défaillantes (et donc indisponibles) et sont locales ou externalisées.

Nous considérons d'abord l'engagement de deux acteurs de maintenance A_i et A_{i+1} (par exemple, un mainteneur et un expert). Avec ces deux catégories d'acteurs, nous représentons les différentes situations de traitement. Seul, le cas D correspondant au non traitement de l'intervention par l'acteur A_i (cf. paragraphe IV.2.2.2.1) n'est pas explicitement modélisé ; ce cas est associé à la contribution de l'acteur A_{i+1} (cas C). Le modèle établi a pour but de présenter le principe de modélisation mais il peut être étendu à des situations plus complexes.

Ce modèle peut de la même manière être appliqué à l'intégralité du processus d'intervention ou à une seule étape de ce processus comme, par exemple, le diagnostic, étape d'analyse dépendant fortement des connaissances disponibles.

IV.3.1.1 Outil de simulation utilisé

Pour modéliser et simuler le RdP, nous avons choisi un outil logiciel dédié aux RdP Stochastiques. Il s'agit de l'outil *StpnPlay* [StpnPlay 08], logiciel libre développé par une équipe de recherche tchèque [Capek 01]. Nous avons retenu cet outil car il permet de traiter des RdP temporisés et stochastiques, simulant différentes lois de distribution. Il permet de réaliser des simulations et l'exportation des marquages des places ou des franchissements des transitions, selon différents paramétrages de simulation. D'autres outils semblables sont possibles.

IV.3.1.2 Mécanismes élémentaires

Nous nous appuyons sur plusieurs "mécanismes" élémentaires pour établir le modèle RdP.

IV.3.1.2.1 Génération des interventions

Le premier élément composant le réseau est le modèle de génération des sollicitations initiant les scénarios (Figure IV.11).

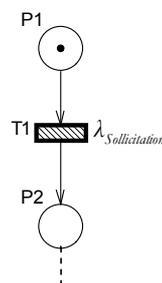


Figure IV.11. Modélisation RdP de la génération des sollicitations

Nous considérons une génération séquentielle des sollicitations suivant une loi exponentielle de paramètre $\lambda_{\text{Sollicitation}}$ qui permet de modéliser le comportement d'un équipement selon son taux de sollicitation pour des interventions correctives et / ou préventives.

Nous supposons d'abord un seul équipement à maintenir et un seul acteur par catégorie pour traiter les sollicitations. Les premières extensions seront :

- le traitement séquentiel de la sollicitation de plusieurs équipements par un seul acteur A_i ,
- le traitement séquentiel de la sollicitation de plusieurs équipements par plusieurs acteurs A_i ,
- le traitement simultané de plusieurs sollicitations relatives à plusieurs équipements par plusieurs acteurs A_i (l'acteur A_i redevenant disponible lorsque l'acteur A_{i+1} réalise le traitement de l'intervention).

La modélisation de plusieurs équipements sera réalisée par modification du processus de sollicitation (génération des sollicitations). La modélisation de plusieurs acteurs A_i sera effectuée par adaptation du marquage initial de la place représentant l'acteur A_i disponible.

IV.3.1.2.2 Modélisation des cas de traitement

Le deuxième élément constitutif du RdP traite la répartition des interventions entre les différents cas de traitement (présentés au paragraphe IV.2.2.2.1). Nous modélisons l'engagement de deux acteurs avec l'aiguillage de l'intervention (P3) parmi les trois cas :

- A : l'acteur A_i effectue le traitement à partir de ses seules connaissances (P6),
- B : l'acteur A_i consulte, via le e-service, une base de données pour renforcer ses connaissances (P5),
- C : l'acteur A_i sollicite l'aide de l'acteur A_{i+1} (ayant un niveau de connaissances plus élevé), toujours grâce au e-service (P4).

Ces différents cas de traitement des interventions sont représentés sur la Figure IV.12.

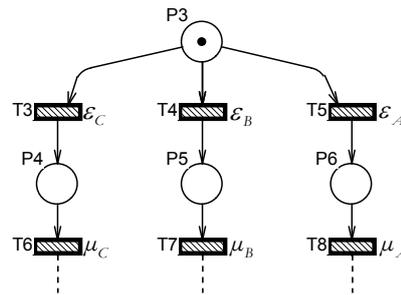


Figure IV.12. Modélisation RdP des répartitions de traitement

Les transitions T3, T4 et T5 représentent la distribution des traitements entre les trois cas. Nous leur associons une loi exponentielle de paramètre très élevé ($\epsilon_A, \epsilon_B, \text{ et } \epsilon_C \gg 1$) afin de représenter les aiguillages (cf. fonctionnalités de l'outil StpnPlay) :

$$\text{probabilité du cas A : } \epsilon_A / \sum_{i=A}^C \epsilon_i, \text{ du cas B : } \epsilon_B / \sum_{i=A}^C \epsilon_i \text{ et du cas C : } \epsilon_C / \sum_{i=A}^C \epsilon_i.$$

La durée de chaque traitement est modélisée par les taux associés aux transitions T6, T7 et T8 : lois exponentielles de paramètre respectif μ_A, μ_B et μ_C .

IV.3.1.2.3 Modélisation du partage de ressources

Les ressources partagées sont les TIC et l'acteur A_{i+1} .

Sur la Figure IV.13, nous représentons l'engagement des TIC pour les cas B et C et celui de l'expert pour le cas C.

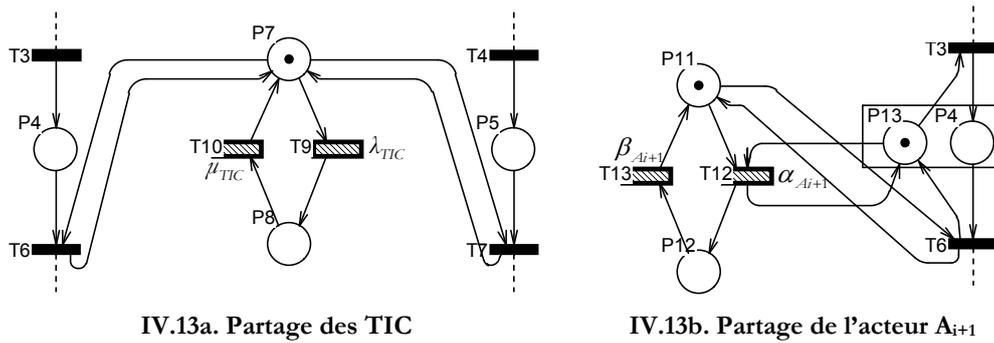


Figure IV.13. Modélisation RdP de la disponibilité des TIC et de l'acteur A_{i+1}

Sur la Figure IV.13a, le marquage de la place P7 indique que les TIC sont disponibles, celui de la place P8 correspond à leur indisponibilité. La défaillance et la réparation des TIC (par d'autres acteurs que ceux impliqués dans le processus de maintenance des équipements de production) sont représentées respectivement par le franchissement des transitions T9 et T10 auxquelles sont associées des lois exponentielles de paramètre λ_{TIC} (taux de défaillance des TIC) pour T9 et μ_{TIC} (taux de réparation des TIC) pour T10.

Sur la Figure IV.13b, le marquage de la place P11 indique que l'acteur A_{i+1} est disponible ; celui de la place P12 traduit son indisponibilité consécutive, par exemple, à son engagement dans un autre processus. Les transitions T12 et T13 représentent respectivement cet engagement dans une autre activité et son retour à l'état disponible. T12 est modélisée par une loi exponentielle de paramètre $\alpha_{A_{i+1}}$ et T13, par $\beta_{A_{i+1}}$. Si une intervention de type C est amorcée (marquage de la place P4), l'acteur A_{i+1} est alors dédié à cette activité : il ne peut plus s'engager dans un autre processus tant que l'intervention C n'est pas réalisée (rôle de la place P13 équivalent à un arc inhibiteur entre P4 et T12).

IV.3.1.3 Modèle de simulation

Dans le modèle de simulation, nous considérons le traitement des sollicitations par un acteur local A_i qui peut être aidé par un second acteur externalisé A_{i+1} .

Nous donnons la représentation RdP de ce modèle sur la Figure IV.14.

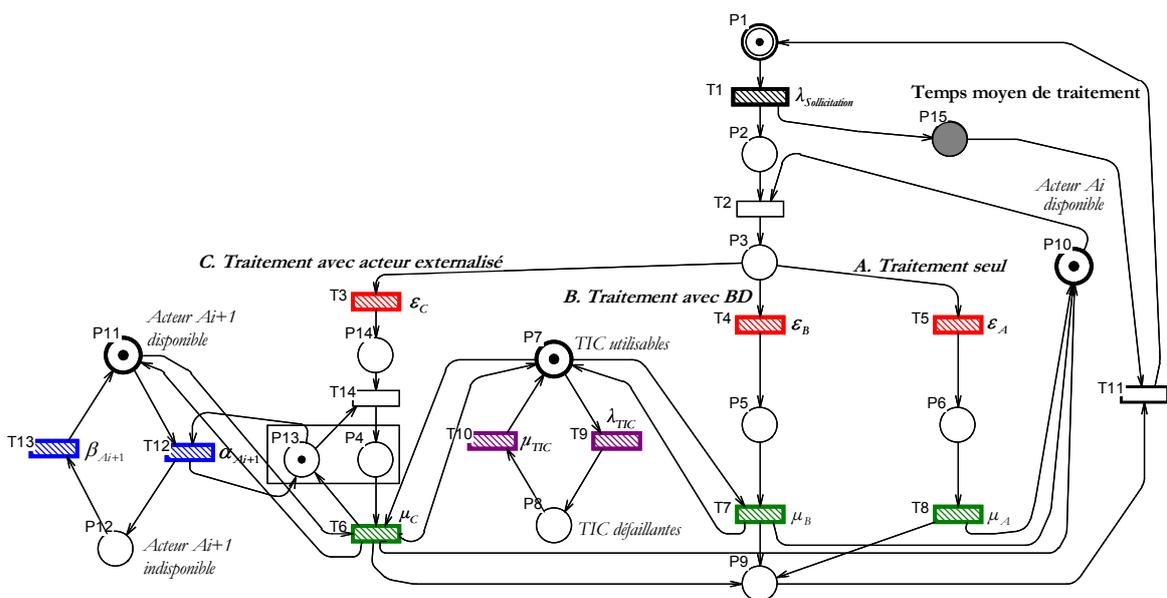


Figure IV.14. Modèle RdP des activités de e-maintenance

Ce réseau permet de décrire l'engagement de l'acteur A_i bénéficiant de l'aide des TIC et de l'acteur A_{i+1} externalisé ; il comporte les différents mécanismes présentés au paragraphe IV.3.1.2 : la génération des sollicitations (via la transition T1), les trois principaux traitements réalisés par un acteur A_i , l'assistance des TIC et d'un acteur A_{i+1} externalisé.

La transition T2 modélise l'engagement de l'acteur A_i dans le processus de traitement de l'intervention, la transition T11 représente le retour du système maintenu à un état de fonctionnement.

Pour chaque demande d'intervention générée, un des trois traitements A, B ou C est réalisé si l'acteur A_i est disponible. Pour les traitements B et C, les TIC doivent être disponibles ; pour le traitement C, l'acteur A_{i+1} doit également être disponible. Les TIC peuvent devenir indisponibles à tout instant selon leur taux de défaillance (λ_{TIC}) alors que l'acteur A_{i+1} ne peut pas s'engager dans une autre activité s'il est déjà requis pour le traitement C.

IV.3.1.4 Principes de simulation

Les simulations avec l'outil StpnPlay peuvent être effectuées en considérant le fonctionnement du réseau sur une durée fixée ou pour un nombre donné de franchissements de transition.

La mesure du temps est faite à partir d'une unité de temps (notée ut) non spécifique.

Nous avons paramétré initialement le réseau à certaines valeurs qui serviront, pour la suite, de valeurs de référence retenues par défaut :

- $\lambda_{Sollicitation}=0,01$ sollicitation/ut,
- $\lambda_{TIC}=0,1$ défaillance/ut,
- $\mu_{TIC}=1$ réparation/ut,
- $\alpha_{A_{i+1}}=0,1$ sollicitation externe requise/ut,
- $\beta_{A_{i+1}}=1$ service externe/ut,
- répartition entre les trois traitements : 50% de cas A, 25% de cas B et 25% de cas C ($\epsilon_A = 50\ 000$, $\epsilon_B = 25\ 000$, $\epsilon_C = 25\ 000$),
- $\mu_C=\mu_B=\mu_A=1$ réparation/ut.

Nous donnons sur la Figure IV.15 un ensemble de résultats déduits de la simulation du modèle RdP pour ces conditions de fonctionnement.

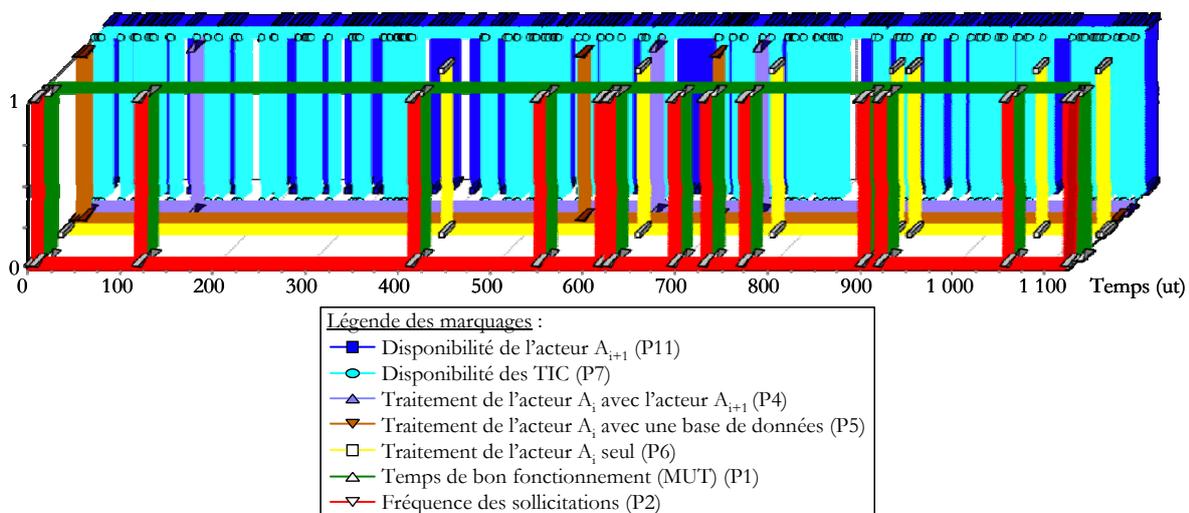


Figure IV.15. Exemple de marquages obtenus avec StpnPlay, pour le modèle RdP

Les différents tracés représentent l'évolution au cours du temps du marquage de sept places significatives du RdP.

Dans cette simulation, nous avons considéré 500 franchissements consécutifs de transition sur une durée d'environ 1100 ut.

Le marquage des places varie entre 0 et 1 (RdP sauf) depuis le marquage initial suivant : un jeton dans chaque place P1, P10, P7, P11 et P13.

La génération des demandes d'intervention (représentée par le tir de T1) et la fin d'intervention (représentée par le franchissement de T11) induisent les évolutions du marquage de P1 et de P15. Les temps moyens d'occupation de P1 et de P15 représentent respectivement le MUT (Mean Up Time) et le MDT (Mean Down Time) du système maintenu ; la fréquence de passage en P2 (ou fréquence de tirs de la transition T1) est équivalente au MTBF (Mean Time Between Failure) pour des interventions correctives.

Pour l'exemple de simulation de la [Figure IV.15](#), 13 sollicitations d'intervention ont été générées et traitées, conduisant à 7 traitements A, 3 traitements B et 3 traitements C.

Le temps moyen global de traitement est de 1,2ut, avec pour le traitement A : 1ut, pour le traitement B : 1,3ut et pour le traitement C : 1,4ut.

L'acteur A_{i+1} et les TIC ont été plusieurs fois indisponibles sur la période de simulation sans avoir vraiment influencé le déroulement des interventions (ceci est lié aux instants d'occurrence des événements correspondants).

Lors de l'étude de sensibilité, nous analyserons plus en détail le marquage de chaque place du réseau (par une exportation de la simulation via des tableurs au format csv, exploitable à l'aide du tableur Excel) suivant la chronologie des franchissements de transition et des changements d'état des places.

Les résultats de simulation que nous allons présenter dans les paragraphes [IV.3.2](#) et [IV.3.3](#) sont associés à des paramétrages correspondant à des situations industrielles afin d'obtenir une illustration de notre démonstration.

IV.3.2 Étude de sensibilité

Nous allons maintenant analyser le comportement du réseau pour étudier plus précisément l'impact de l'indisponibilité des TIC ou de A_{i+1} (acteur externalisé) sur le temps moyen de traitement des interventions et les temps moyens de traitement des cas B et C. Nous allons mener une étude de sensibilité du modèle en faisant varier différents paramètres significatifs du réseau à savoir :

- pour les TIC : λ_{TIC} et μ_{TIC} ,
- pour l'acteur : $\alpha_{A_{i+1}}$ et $\beta_{A_{i+1}}$.

Afin de faciliter la saisie de certaines grandeurs caractéristiques, nous complétons le modèle RdP par l'insertion d'éléments de modélisation supplémentaires (places P16 à P19 et transitions correspondantes sur la [Figure IV.16](#)), en relation directe avec le mode d'exportation des résultats vers le tableur Excel.

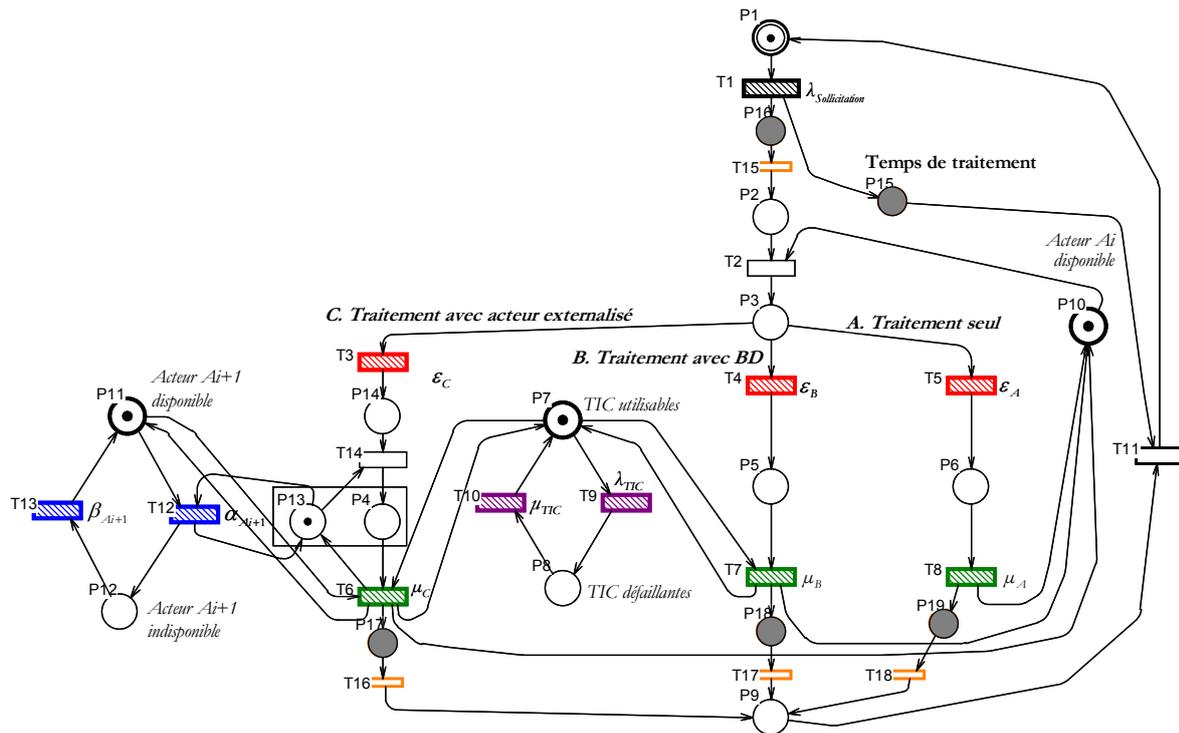


Figure IV.16. RdP développé pour l'étude de sensibilité

Nous allons effectuer une étude de sensibilité pour examiner l'influence des paramètres des TIC (λ_{TIC} et μ_{TIC}) et de l'acteur (α_{Ai+1} et β_{Ai+1}) sur le temps moyen de traitement des interventions et les temps moyens de traitement des cas B et C.

IV.3.2.1 Évolution du temps moyen de traitement des interventions

Avant d'étudier l'influence des paramètres du RdP, nous avons analysé l'évolution des résultats de simulation, notamment du temps moyen de traitement d'une intervention (place P15), en fonction du nombre de simulations effectuées.

Nous présentons sur la [Figure IV.17](#) l'évolution de la dispersion du temps moyen de traitement des interventions en fonction du nombre de simulations (correspondant au nombre de tirs de transitions). Pour cette étude, nous avons conservé la valeur des paramètres définie pour la simulation de la [Figure IV.15](#).

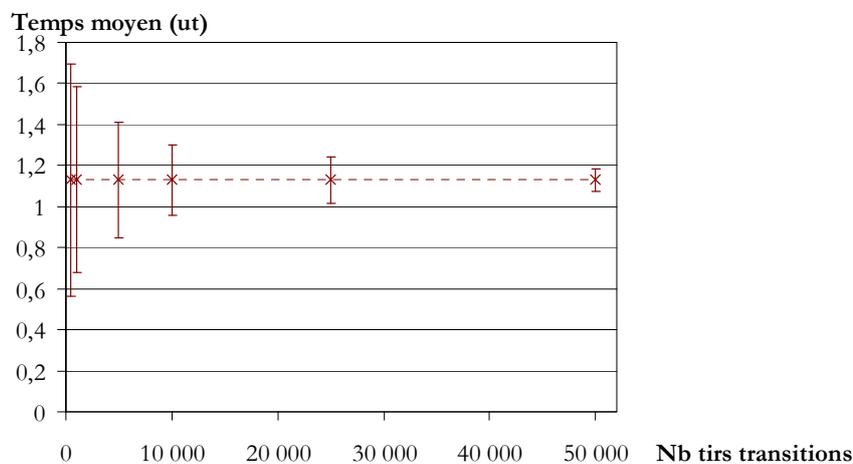


Figure IV.17. Évolution du temps moyen de traitement en fonction du nombre de simulations

Nous réalisons plusieurs fois chaque simulation (pour un même jeu de paramètres et un même nombre de tirs de transitions). Les tracés de la [Figure IV.17](#) nous permettent de constater qu'il faut atteindre 50 000 tirs de transitions pour avoir une dispersion du temps moyen de traitement des interventions inférieure à 10%.

Chaque simulation sera donc réalisée sur un total de 50 000 franchissements de transition, assurant une stabilisation des résultats permettant l'expression des temps moyens.

Sur la [Figure IV.18](#), nous présentons l'évolution du temps moyen de traitement des interventions en fonction du paramètre λ_{TIC} .

Nous choisissons $\mu_{TIC}=0,2$ réparation/ut, les autres paramètres étant fixés aux valeurs de référence définies pour la simulation de la [Figure IV.15](#).

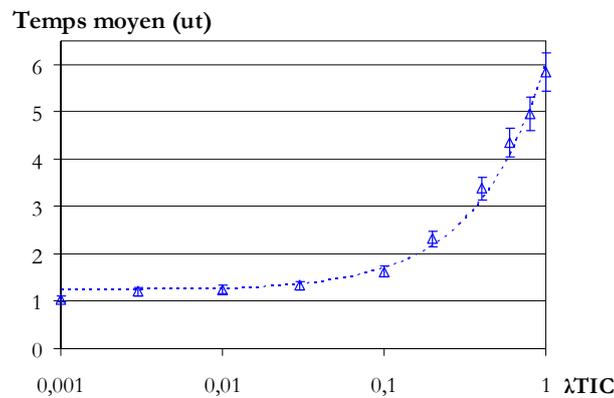


Figure IV.18. Évolution du temps moyen de traitement en fonction de λ_{TIC}

Examinons d'abord la dispersion des résultats de simulation en réalisant plusieurs fois chaque simulation (pour un même jeu de paramètres).

En considérant la totalité de la plage de variation, nous obtenons une dispersion du temps moyen de traitement des interventions d'environ 10%. Cette variation des résultats s'explique par le déroulement des simulations compte tenu de l'architecture du modèle et de la dynamique des lois événementielles en jeu.

Les résultats sont très proches pour de faibles valeurs du taux de défaillance λ_{TIC} alors que les écarts sont plus importants pour des taux élevés avec, par exemple, 18% pour $\lambda_{TIC}=1$, ce cas correspondant à un déclassement extrême des performances des TIC (disponibilité inférieure à 20%).

REMARQUE. L'ensemble des résultats issus des modèles RdP est représenté suivant des tracés semi-logarithmiques (avec l'axe des abscisses suivant une échelle logarithmique).

Nous avons donc constaté une variabilité des résultats d'environ 10%, pour la suite des résultats nous représenterons uniquement les valeurs moyennes déduites de plusieurs simulations identiques.

Nous avons analysé le temps moyen de traitement des interventions ([Figure IV.19](#)) en fonction de λ_{TIC} , pour plusieurs valeurs de μ_{TIC} (évolution de l'indisponibilité des TIC), et en fonction de $\alpha_{A_{i+1}}$, pour plusieurs valeurs de $\beta_{A_{i+1}}$ (évolution de l'indisponibilité de l'acteur A_{i+1}). Pour l'évolution de l'indisponibilité de l'expert, nous neutralisons les effets des TIC en prenant $\lambda_{TIC}=0,001$ défaillance/ut

et $\mu_{TIC}=100$ réparation/ut. Les autres paramètres sont fixés aux valeurs de référence données au paragraphe IV.3.1.4.

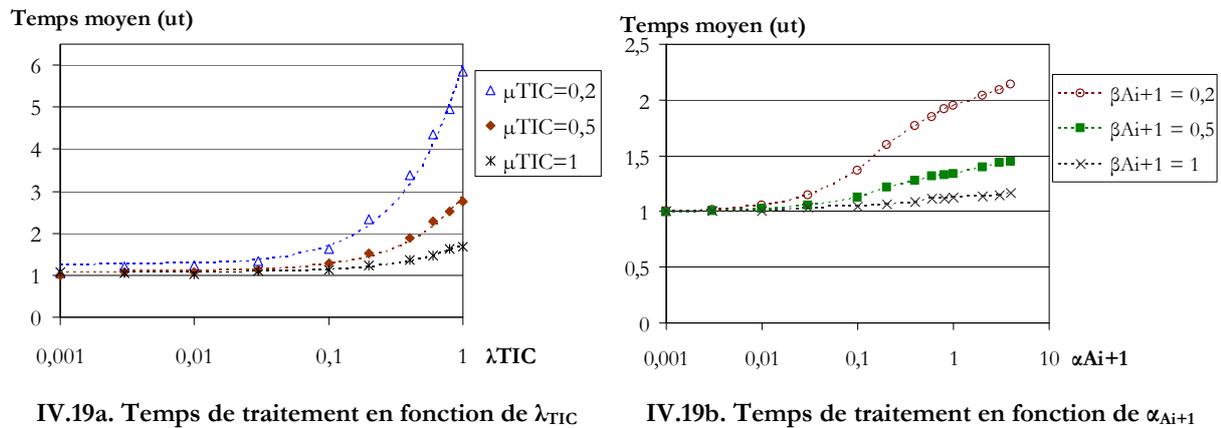


Figure IV.19. Temps moyen de traitement en fonction de λ_{TIC} et de α_{Ai+1}

Les tracés de la Figure IV.19a montrent que l'évolution du temps moyen de traitement en fonction de λ_{TIC} est décomposée en deux parties.

Pour des valeurs de λ_{TIC} inférieures à 0,1 défaillance/ut, le temps de traitement des sollicitations est sensiblement constant.

Au-delà de $\lambda_{TIC}=0,1$, l'augmentation de λ_{TIC} conduit à l'augmentation du temps de traitement (là encore, nous avons considéré une dégradation conséquente des performances des TIC). De la même manière, pour un μ_{TIC} faible, correspondant à un temps de réparation TIC élevé, le temps de traitement est important (jusqu'à environ 6ut pour $\mu_{TIC}=0,2$ et $\lambda_{TIC}=1$ (disponibilité des TIC inférieure à 20%)). Évidemment, le temps moyen de traitement diminue lorsque la disponibilité des TIC augmente (position relative des tracés lorsque μ_{TIC} augmente).

La forme exponentielle du tracé résulte du lien direct entre l'indisponibilité des TIC et l'impossibilité des traitements B et C.

Sur la Figure IV.19b, nous représentons l'évolution du temps moyen de traitement en fonction de α_{Ai+1} .

Pour de faibles valeurs de α_{Ai+1} , le temps de traitement des sollicitations est globalement constant. Puis, l'augmentation de α_{Ai+1} entraîne une augmentation du temps de traitement jusqu'à une stabilisation de type asymptotique. De même, l'augmentation du temps de retour à l'état disponible de l'acteur A_{i+1} conduit à une augmentation du temps de traitement (position relative des tracés).

La limite asymptotique est liée au fait que lorsque l'acteur A_{i+1} est requis pour le traitement C (marquage de la place P4), il ne peut plus s'engager dans un autre processus. Ainsi, son indisponibilité est limitée.

IV.3.2.2 Variations de λ_{TIC} pour différentes valeurs de μ_{TIC}

Nous analysons plus précisément l'influence de la disponibilité des TIC sur le temps moyen de traitement du cas B en faisant varier λ_{TIC} , pour différentes valeurs de μ_{TIC} (les autres paramètres étant fixés aux valeurs nominales définies au paragraphe IV.3.1.4).

Nous construisons les tracés représentés sur la Figure IV.20.

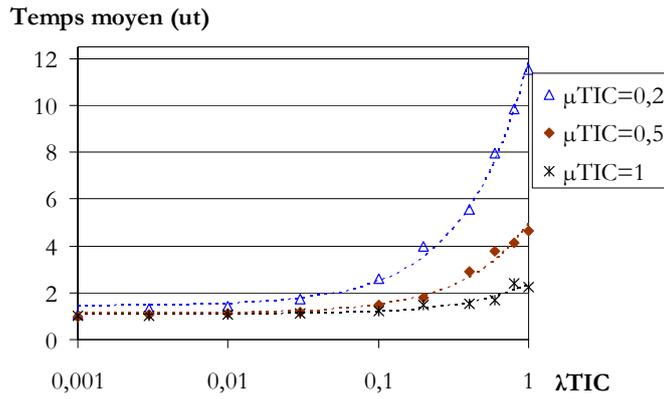


Figure IV.20. Évolution du temps moyen de traitement des cas B en fonction de λ_{TIC}

Nous retrouvons la même forme d'évolution que celle des tracés de la Figure IV.19a ; seules les valeurs du temps de traitement sont différentes.

Là encore, le temps moyen de traitement diminue évidemment lorsque la disponibilité des TIC augmente (cf. position relative des tracés lorsque μ_{TIC} augmente).

Ces relevés montrent toute l'influence des TIC et de leur disponibilité sur le temps de traitement des cas B et de l'ensemble des interventions. Dès que l'indisponibilité des TIC dépasse 10%, une augmentation de l'indisponibilité des TIC engendre une augmentation de la durée moyenne de traitement (par exemple, pour une indisponibilité des TIC de 50%, la durée moyenne de traitement augmente également de 50%).

IV.3.2.3 Variations de $\alpha_{A_{i+1}}$ pour différentes valeurs de $\beta_{A_{i+1}}$

Sur la Figure IV.21, nous considérons l'influence de la disponibilité de l'acteur A_{i+1} , en faisant varier $\alpha_{A_{i+1}}$ pour différentes valeurs de $\beta_{A_{i+1}}$. Nous fixons $\lambda_{TIC}=0,001$ défaillance/ut et $\mu_{TIC}=100$ réparations/ut pour neutraliser les effets des TIC, les autres paramètres sont fixés aux valeurs de référence données au paragraphe IV.3.1.4.

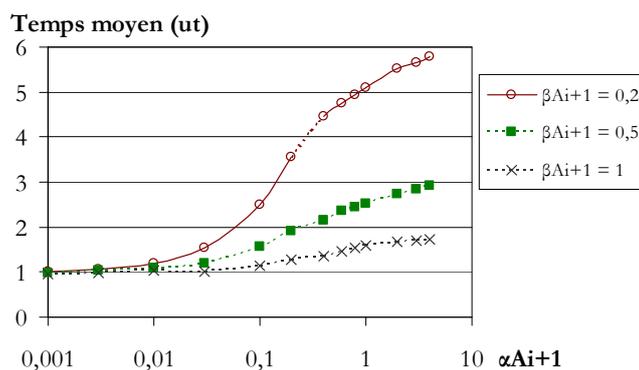


Figure IV.21. Évolution du temps moyen de traitement des cas C en fonction de $\alpha_{A_{i+1}}$

Nous représentons sur cette figure l'évolution du temps moyen de traitement des cas C.

Nous retrouvons les mêmes allures de tracé que celles de la Figure IV.19b. L'évolution du temps moyen de traitement suit globalement une forme logarithmique tendant vers une valeur asymptotique pour les valeurs élevées de $\alpha_{A_{i+1}}$. La croissance de $\alpha_{A_{i+1}}$ et la décroissance de $\beta_{A_{i+1}}$ traduisent une indisponibilité croissante de l'acteur A_{i+1} mais nous rappelons que les traitements C sont prioritaires

pour cet acteur qui ne peut plus s'engager dans un autre processus dès qu'il est requis pour ce traitement.

Par exemple, pour $\alpha_{A_{i+1}}=1$ sollicitation externe requise/ut, $\beta_{A_{i+1}}=0,5$ service externe/ut, le temps moyen de traitement est de $2,5ut$ alors que la durée théorique de celui-ci est de $1ut$ ($\mu_C=1$).

Cette deuxième étude montre l'influence de la disponibilité de l'acteur A_{i+1} sur le temps moyen de traitement des cas C et de l'ensemble des interventions. De la même manière que les caractéristiques des TIC, la disponibilité de l'acteur A_{i+1} a un impact tout à fait prévisible sur la durée de traitement des interventions et donc sur la performance du service de maintenance.

S'il n'est pas possible d'influer davantage sur la disponibilité de l'acteur A_{i+1} (sauf en modulant le nombre d'acteurs A_{i+1}), une redistribution des connaissances entre l'acteur A_i (mode local) et l'acteur A_{i+1} (mode externalisé) peut alors réduire la dépendance envers A_{i+1} .

IV.3.2.4 Variations de λ_{TIC} pour différentes valeurs de $\alpha_{A_{i+1}}$

Pour compléter les deux premières études, nous analysons les effets combinés des TIC et de la disponibilité de l'acteur A_{i+1} sur le temps moyen de traitement des cas C (Figure IV.22). Nous fixons $\beta_{A_{i+1}}=1$ service externe/ut et $\mu_{TIC}=100$ réparations/ut, les autres paramètres sont fixés aux valeurs de référence données au paragraphe IV.3.1.4.

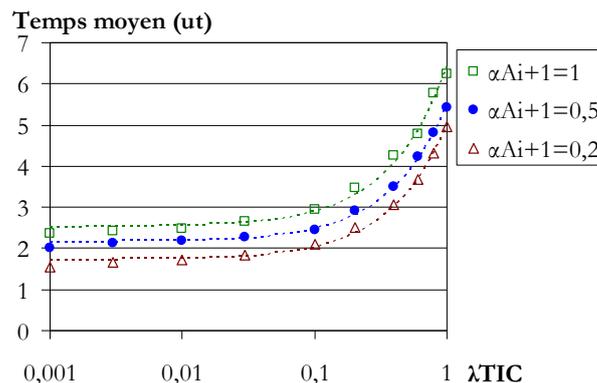


Figure IV.22. Évolution du temps moyen de traitement des cas C en fonction de λ_{TIC}

Sur la Figure IV.22, nous avons représenté l'évolution du temps moyen de traitement des cas C en fonction de λ_{TIC} , pour plusieurs valeurs de $\alpha_{A_{i+1}}$.

Les différents tracés ont une allure globalement exponentielle ; l'augmentation de λ_{TIC} conduit à l'augmentation du temps de traitement pour des valeurs de λ_{TIC} supérieures à 0,1 (en dessous de $\lambda_{TIC}=0,1$ défaillance/ut, le temps de traitement est sensiblement constant).

Il en est de même pour la diminution de la disponibilité de l'acteur A_{i+1} (augmentation de $\alpha_{A_{i+1}}$) qui conduit aussi à l'augmentation du temps de traitement des cas C.

Ce premier modèle RdP a permis d'étudier l'influence de la disponibilité des TIC et de l'acteur A_{i+1} sur les conditions de réalisation des interventions de maintenance et ce, pour différentes situations. Nous avons analysé l'influence de ces paramètres sur les durées de traitement des interventions. L'étude des durées d'interventions permet un dimensionnement global des performances du service de maintenance en agissant sur les paramètres du RdP.

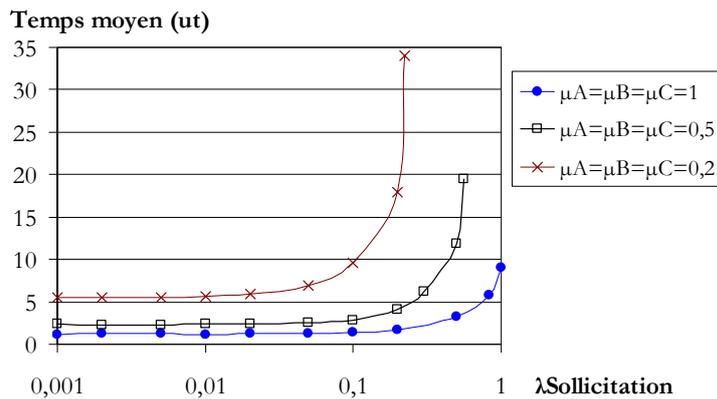


Figure IV.24. Évolution du temps moyen de traitement pour différents taux de réparation

Les différents tracés ont une allure globalement exponentielle ; l'augmentation de $\lambda_{\text{Sollicitation}}$ conduit à l'augmentation du temps de traitement pour différentes valeurs de $\lambda_{\text{Sollicitation}}$ avec un seuil aux environs de 0,1 selon le paramétrage des taux de réparation (en dessous de ce seuil, les temps moyens de traitement de chaque paramétrage des taux de réparation sont sensiblement constants).

Ce phénomène résulte de la saturation du service de maintenance qui ne réussit plus à traiter une intervention avant l'occurrence de la sollicitation suivante induisant une attente avant traitement.

IV.3.3.2 Étude stratégique

Sur la Figure IV.25, nous étudions maintenant l'influence du nombre d'acteurs A_i et du taux de sollicitation sur le temps d'attente entre la génération de la sollicitation et la prise en charge de l'intervention. Nous fixons μ_A , μ_B et μ_C à 1 réparation/ut, $\lambda_{\text{TTC}} = 0,5$ défaillance/ut et $\alpha_{A_i+1} = 0,5$ sollicitation externe requise/ut. Pour les autres paramètres, nous gardons les mêmes valeurs que pour la simulation précédente.

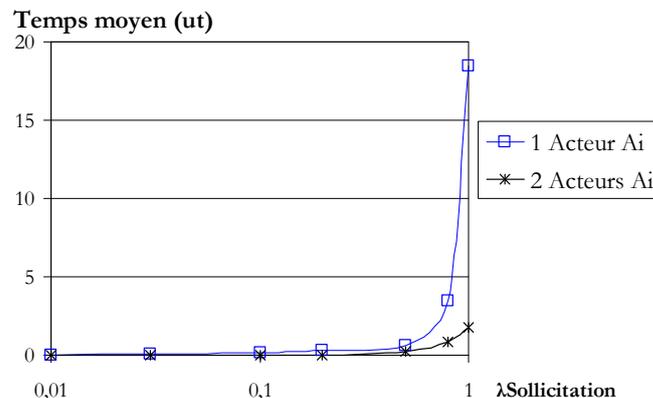


Figure IV.25. Évolution du temps d'attente des traitements des sollicitations (P2)

Nous étudions l'évolution du temps moyen d'attente de traitement des sollicitations en fonction de $\lambda_{\text{Sollicitation}}$. Pour un $\lambda_{\text{Sollicitation}}$ inférieur à 0,5 sollicitation/ut, le temps d'attente des défaillances reste inférieur à 1ut mais, au-delà, le temps d'attente augmente de manière exponentielle avec un seul acteur A_i , alors qu'avec deux acteurs A_i l'attente atteint seulement 2ut.

L'engagement d'un second acteur A_i permet bien sûr de traiter plus de sollicitations et limite la "saturation" du service de maintenance modélisé. Nous retrouvons ici l'influence directe du nombre d'acteurs sur la capacité de traitement du service de maintenance.

Nous étudions également l'influence de la répartition des traitements entre les cas A, B et C modélisant la répartition des connaissances entre le mode local (A) et le mode externalisé (B et C) présentée au paragraphe IV.1.3.

Sur la Figure IV.26, nous avons représenté le temps moyen de traitement des interventions en fonction de λ_{TIC} . Les autres paramètres sont fixés aux mêmes valeurs que pour les deux simulations précédentes.

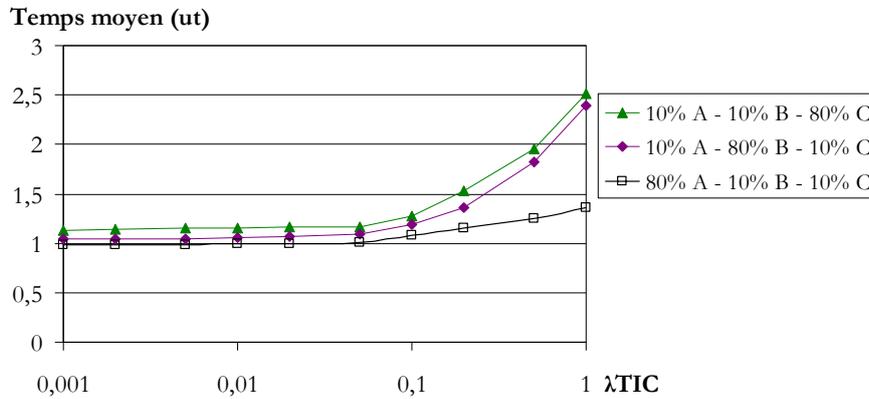


Figure IV.26. Évolution du temps moyen de traitement des interventions en fonction de λ_{TIC}

Sur les tracés de la Figure IV.26, nous constatons deux zones distinctes. Pour des valeurs de λ_{TIC} inférieures à 0,1 défaillance/ut, le temps de traitement est sensiblement constant. Sur cette première partie du tracé, les TIC sont peu défaillantes et permettent de réaliser l'ensemble des traitements des interventions lorsque les sollicitations surviennent ; les capacités de traitement du service de maintenance sont supérieures aux sollicitations d'intervention.

Par contre, au-delà de $\lambda_{TIC}=0,1$ défaillance/ut, les TIC sont de plus en plus défaillantes et conduisent à une augmentation globalement linéaire des durées d'attente et de traitement des sollicitations.

La comparaison de ces trois courbes (correspondant à trois répartitions différentes entre les traitements A, B et C) permet de constater qu'une forte externalisation des ressources de maintenance rend le service de maintenance dépendant de la disponibilité des TIC et de l'acteur A_{i+1} et fragilise la performance du service pour des taux de défaillance des TIC et d'indisponibilité de l'acteur A_{i+1} élevés. Nous retrouvons, évidemment, les premiers constats effectués lors de la formulation théorique de la répartition des connaissances (cf. paragraphe IV.1.3).

IV.3.4 Synthèse du RdP

L'utilisation du formalisme RdP pour modéliser l'engagement d'un service de maintenance exploitant les fonctionnalités des TIC nous a permis d'établir un modèle de base pratique. Différentes logiques de traitement des interventions ont été rapportées sur ce modèle, permettant d'étudier l'influence de la disponibilité des TIC et des acteurs externalisés et la répartition des sollicitations entre le mode local et le mode externalisé (cas de traitement A, B et C), en restituant de manière formelle des scénarios généraux de e-maintenance.

Cette modélisation a permis d'analyser les principaux paramètres de l'engagement des ressources nécessaires aux interventions.

Nous ne sommes pas allés très avant dans l'exploitation des résultats que peut donner ce type de modèle car ceux-ci n'ont, bien évidemment, de signification que par rapport aux conditions d'expérimentation abordées.

Par contre, nous avons montré la représentativité du modèle vis-à-vis des situations pratiques de e-maintenance ainsi que toute la potentialité d'exploitation via, principalement, les possibilités de paramétrage.

Si l'aspect collaboration est bien pris en compte dans cette modélisation, les caractéristiques sous-jacentes de cette collaboration entre les acteurs n'apparaissent pas explicitement.

Dans le paragraphe suivant, nous allons nous appuyer sur une modélisation dédiée via l'approche objet et les systèmes multiagents qui permettra d'approfondir la logique de distribution des connaissances entre le mode local et le mode externalisé et de considérer l'aspect collaboration entre les acteurs de maintenance.

IV.4 MODÉLISATIONS DÉDIÉES

Nous avons choisi deux formes de modélisation dédiée : le développement d'un simulateur dédié exploitant le concept d'objets et celui d'un système multiagents (l'agent pouvant être vu comme une évolution de l'objet).

La logique agents offre d'importantes possibilités de modélisation et de simulation grâce, notamment, à la notion de négociation entre agents ; cela permettra de modéliser les centres de décision (considérés au chapitre III) et leur collaboration.

La modélisation objet permettra également de représenter des centres de décision en s'appuyant sur une programmation en C++ plus simple à développer que celle des agents.

Nous avons mené ces développements en parallèle, avec une approche similaire à celle décrite dans le paragraphe IV.2 pour la modélisation des scénarios de e-maintenance.

IV.4.1 Modélisation objet

Nous proposons un simulateur dédié, basé sur la modélisation objet avec le langage de programmation C++.

Ce simulateur appelé MKBS (Maintenance Knowledge-Based Simulation) a été présenté dans [Garcia 08] et [Seguy 09].

IV.4.1.1 Principe et objectif du simulateur MKBS

Comme le modèle précédent, ce simulateur a pour objectif de modéliser et d'évaluer les performances de scénarios de e-maintenance en fonction de la répartition des connaissances. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'efficacité des interventions en évaluant la disponibilité des connaissances nécessaires à la réalisation des interventions. Nous évaluons également l'efficacité des interventions via l'estimation des durées (et coûts) d'intervention.

L'outil de simulation MKBS est constitué des éléments suivants :

- des entrées : caractéristiques paramétrables des ressources et du déroulement des interventions simulées,
- des sorties : résultats des simulations en fonction des indicateurs de performance,

- des règles de fonctionnement du simulateur,
- des règles d'incrémentation des scénarios,
- des indicateurs de performance permettant de caractériser le déroulement des scénarios de e-maintenance.

Nous avons programmé ce simulateur de manière à permettre un paramétrage des entrées et une exportation des sorties intégrant les aspects statique et dynamique des performances présentés au paragraphe IV.1.3.

Les règles de fonctionnement (cf. paragraphe IV.2.2) concernent :

- la génération des sollicitations,
- la répartition des interventions entre les catégories d'acteurs, selon leurs compétences,
- le traitement des interventions (A, B, C et D) par les acteurs.

Nous nous appuyons sur les composants et scénarios formalisés au chapitre II avec les diagrammes statiques et dynamiques UML.

IV.4.1.2 Règles de simulation des scénarios

IV.4.1.2.1 Paramétrage des sollicitations

Nous affectons un niveau de complexité de résolution à chaque sollicitation générée par le simulateur. La répartition des sollicitations entre les cinq niveaux de complexité peut suivre une distribution de type Pareto (par exemple, une répartition des interventions de type : 50% de niveau 1, 30% de niveau 2, 10% de niveau 3, 7% de niveau 4 et 3% de niveau 5, selon les cinq niveaux de maintenance AFNOR du paragraphe I.1.1.1.3).

La simulation doit permettre une génération paramétrable des sollicitations.

IV.4.1.2.2 Paramétrage des acteurs

Pour chaque catégorie d'acteur, nous définissons leur capacité de traitement en fonction du cas de traitement (A, B, C et D) et du niveau de complexité de la sollicitation (5 niveaux de maintenance).

Par exemple, les connaissances de l'opérateur lui permettent d'assurer 100% des interventions de niveau 1 sans aucune assistance (traitement A), 50% des interventions de niveau 2 avec appui de bases de données (traitement B) et le reste des interventions de niveau 2 (50% restant des interventions de niveau 2) avec l'aide d'un acteur d'une catégorie supérieure (traitement C). L'opérateur n'a pas les connaissances requises pour réaliser les interventions de type 3 et 4 qui seront traitées par une catégorie d'acteur supérieure (traitement D).

Ce type d'informations peut être tiré, par exemple, des états de compétences de plus en plus fréquemment établis par les entreprises sur leurs personnels.

La disponibilité des acteurs est également définie.

IV.4.1.2.3 Paramétrage des durées de traitement

Nous nous intéressons aux indicateurs de durée et de coût des interventions. Pour cela, nous considérons les durées et les coûts de chaque étape du traitement des sollicitations, selon :

- la catégorie de l'acteur (nous considérons aussi le déplacement pour le mainteneur et l'expert),
- le cas de traitement (A, B, C ou D) associé au niveau d'intervention.

La durée totale de traitement d'une intervention sera donc la somme des durées des traitements par les acteurs impliqués en intégrant les temps d'attente de disponibilité de ces acteurs. Le coût total sera établi de la même manière.

L'objectif de la simulation est d'évaluer les performances des activités de e-maintenance via la répartition des connaissances nécessaires à ces activités ; nous envisageons deux cas :

- affectation des durées les plus courtes aux décisions locales ($D_L < D_E$),
- affectation des durées les plus courtes aux décisions externalisées ($D_E < D_L$).

Ces deux situations contraires permettent de considérer et d'évaluer l'impact d'une décision locale ou externalisée et induisent des paramétrages différents.

En liaison avec ces durées, nous associons des coûts horaires afin d'évaluer les coûts de chaque intervention, d'une série d'intervention, des traitements de chaque acteur ou de la défaillance du e-service. De la même manière que pour les unités de temps que nous avons banalisées (choix de ut : unité de temps), nous exprimons les coûts en unité de coût (uc) et en fonction des trois catégories d'acteurs : pour l'opérateur : 1uc (cas de référence), pour le mainteneur : 1,5uc et pour l'expert : 2uc. Ces coefficients sont en accord avec les situations réelles constatées entre les trois catégories d'acteurs considérées.

IV.4.1.3 Simulations des scénarios de e-maintenance

Le simulateur modélise le déroulement de scénarios d'intervention de e-maintenance.

Chaque simulation est initiée par une sollicitation (maintenance préventive ou corrective) nécessitant une intervention sur un équipement.

La simulation est centrée sur les connaissances requises pour l'intervention et les décisions qui la composent, selon son niveau de complexité. Les connaissances sont modélisées par les acteurs et les bases de données. Les acteurs sont répartis selon les trois catégories avec, pour chacun, les différents cas de traitement (A, B, C et D) et leur disponibilité (totale dans un premier temps, puis partielle afin de simuler des scénarios plus réalistes).

Le simulateur permet de paramétrer plusieurs distributions des connaissances entre le mode local et le mode externalisé. Les résultats permettent d'évaluer leurs effets respectifs et d'effectuer des choix de répartition des connaissances circonstanciés pour l'organisation de maintenance.

IV.4.1.3.1 Tests de validation

Nous avons mené d'abord une étude de convergence des résultats fournis par le simulateur. Nous avons réalisé plusieurs séries de simulations dans les mêmes conditions de paramétrage et nous avons étudié les variations de plusieurs indicateurs comme la durée moyenne d'intervention en fonction du nombre de sollicitations. Par exemple, pour 10 000 sollicitations (avec une répartition des connaissances de 50% en mode local (K_{TL}) et de 50% en mode externalisé (K_{TE}) et un fonctionnement total du e-service), nous avons constaté une dispersion des résultats inférieure à 2%.

Ce type d'essais nous a permis de dimensionner le nombre de sollicitations à simuler et de vérifier la dispersion du simulateur.

Chaque simulation sera donc réalisée sur un total de 10 000 sollicitations, garantissant des résultats stables et permettant l'établissement d'indicateurs moyens.

IV.4.1.3.2 Résultats obtenus

Le simulateur permet d'établir certains indicateurs synthétiques concernant le résultat et le déroulement des scénarios de maintenance. Plusieurs séries de simulation ont été nécessaires pour obtenir ces résultats avec différents paramétrages. Ces résultats de simulation concernent :

- le pourcentage d'interventions traitées (directement corrélé à la disponibilité des connaissances) et la performance globale du service de maintenance,
- la répartition des interventions entre les différents scénarios de traitement,
- les coûts et durées moyennes d'intervention.

Le premier résultat concerne le pourcentage d'interventions traitées en fonction de la répartition des connaissances et du taux d'échec du e-service, illustré sur la [Figure IV.27](#). Pour établir ce tracé, nous avons simulé plusieurs distributions des connaissances entre le mode local et le mode externalisé (variation de a : pourcentage de connaissances externalisées) et nous avons également fait varier le taux d'échec du e-service. Les résultats obtenus avec le simulateur sont similaires à ceux établis au paragraphe [IV.1.3](#).

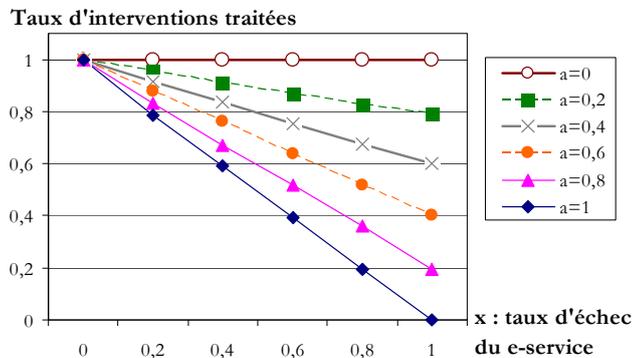


Figure IV.27. Évolution du taux d'interventions traitées

Sur ces tracés, le cas avec $x=1$ (e-service totalement défaillant) correspond à un traitement entièrement local puisque les connaissances externalisées ne sont pas disponibles ; toutes les courbes (excepté pour $a=0$ qui correspond à un traitement entièrement local) décroissent lorsque x augmente.

Par exemple, pour $a=0,4$ ($K_{TL}=60\%$, $K_{TE}=40\%$) et un taux d'échec du e-service égal à 1, seulement 60% des interventions sont résolues.

Ce premier résultat permet un dimensionnement global de la distribution des connaissances d'un service de maintenance. Afin de garantir un taux moyen de réalisation des interventions avec les connaissances nominales requises, pour un taux d'échec du e-service donné, nous pouvons déterminer la distribution globale des connaissances entre le mode local et le mode externalisé.

Par exemple, pour garantir 70% de traitement des interventions avec les connaissances nominales et un taux d'échec du e-service de 20% ($x=0,2$), nous pouvons externaliser jusqu'à 100% des connaissances ($a=1$).

Nous réalisons un état des différents traitements pour la répartition des connaissances de 10 000 simulations, avec $a=0,8$ et cinq valeurs du taux d'échec x du e-service, présenté sur la [Figure IV.28](#). Nous avons considéré une distribution comportant une forte proportion de connaissances

externalisées ($K_{TL}=20\%$ et $K_{TE}=80\%$) pour bien mettre en évidence l'influence de la défaillance du e-service.

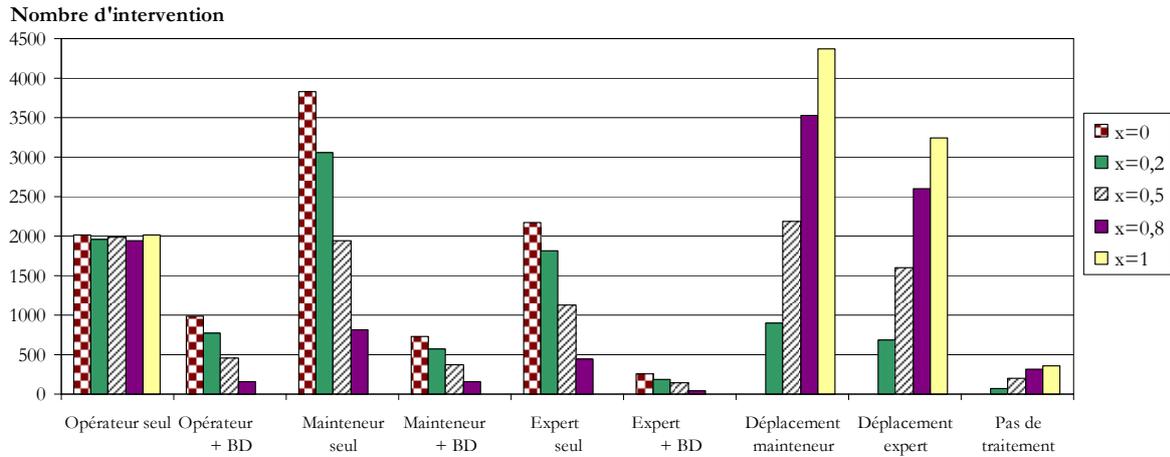


Figure IV.28. Histogramme des traitements avec 80% de connaissances externalisées ($a=0,8$)

Cette distribution des différents scénarios de traitement permet de vérifier le paramétrage initial pour un e-service opérationnel à 100% ($x=0$) ; pour les autres taux d'échec du e-service des modes dégradés interviennent.

Cet histogramme résume les différentes formes de traitement :

- avec ou sans e-service,
- avec apport de connaissances explicites (via les bases de données),
- avec engagement d'un acteur seul ou en collaboration,
- en considérant les modes de traitements dégradés (lorsque le e-service est défaillant),
- en tenant compte des traitements en mode local ou en mode externalisé.

Les traitements en mode local sont associés à l'opérateur seul (cas n°1) alors que les autres traitements sont associés au mode externalisé. Le déplacement du mainteneur ou de l'expert (cas n°7 et 8) s'avère nécessaire lorsque le e-service est défaillant (mode dégradé).

La contrainte de temps limite d'attente de traitement d'une sollicitation fait apparaître une part de sollicitations non traitées (cas n°9) qui, dans des situations réelles, feront l'objet d'un déplacement d'un acteur externalisé ou d'un traitement dégradé par l'opérateur local ne possédant pas forcément l'ensemble des connaissances requises (selon ses capacités de traitement dépendantes des niveaux de complexité des interventions).

Nous considérons maintenant les deux situations de paramétrage des durées d'intervention D_L et D_E décrites dans le paragraphe IV.4.1.2.3.

Les durées moyennes des interventions traitées sont différentes entre ces deux situations :

- durées plus courtes pour les actions locales (Figure IV.29a),
- durées plus courtes pour les actions externalisées (Figure IV.29b).

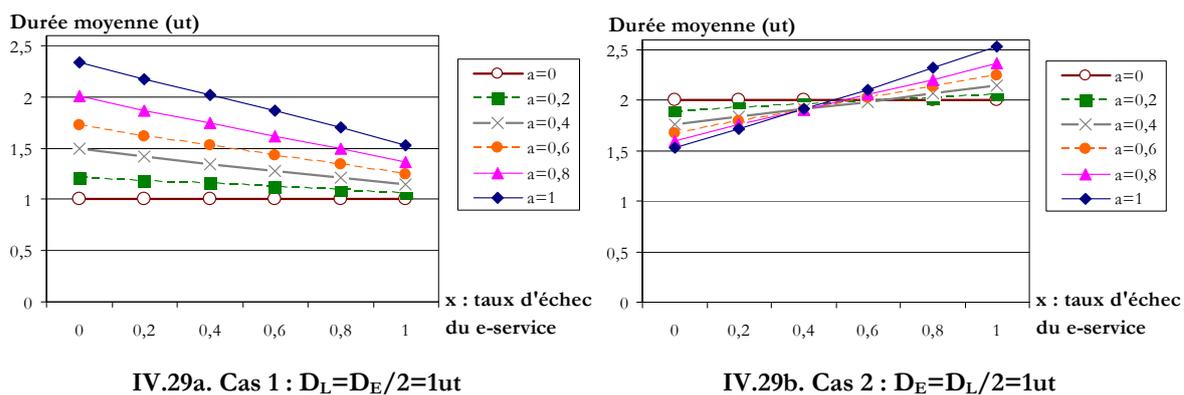


Figure IV.29. Évolution de la durée moyenne d'intervention pour les deux situations $D_L \neq D_E$

Sur la [Figure IV.29a](#), nous constatons que l'augmentation du taux d'échec du e-service conduit à une diminution de la durée moyenne d'intervention à l'exception du cas $a=0$ pour lequel la durée reste constante. Cette diminution de la durée moyenne résulte du fait que l'augmentation du taux d'échec du e-service conduit à un mode dégradé en local au lieu d'un traitement externalisé. La durée de traitement local étant plus courte que celle du traitement externalisé, la durée moyenne diminue.

Sur la [Figure IV.29b](#), nous remarquons deux zones distinctes :

- pour un taux d'échec du e-service inférieur à 50% ($x < 0,5$), l'augmentation des connaissances externalisées provoque la diminution de la durée d'intervention,
- pour un taux d'échec du e-service supérieur à 50%, l'augmentation des connaissances externalisées provoque l'augmentation de la durée d'intervention.

L'allure des tracés de la [Figure IV.29b](#) résulte du même phénomène que celui de la [Figure IV.29a](#). La durée de traitement en local étant plus importante que celle du traitement externalisé, les modes dégradés provoqués par l'échec du e-service conduisent à une augmentation de la durée moyenne des interventions.

Les interventions non traitées (cas n°9 de l'histogramme de la [Figure IV.28](#)) ne sont évidemment pas prises en compte dans ce calcul des durées moyennes d'intervention.

Il faut bien sûr lier ces résultats à la qualité effective des interventions réalisées (au paragraphe [IV.1.2](#), nous avons présenté la relation existante entre la disponibilité des connaissances et la qualité d'une intervention). Par exemple, dans le cas 1 ([Figure IV.29a](#)), si le traitement en mode dégradé d'une intervention effectuée en local induit bien une diminution de la durée, les connaissances nécessaires pour atteindre le niveau nominal n'étant pas disponibles, la qualité de cette intervention est dégradée.

Nous présentons sur la [Figure IV.30](#) le coût moyen des interventions traitées, en fonction de la répartition des connaissances et du taux d'échec du e-service, associé aux deux situations de durée $D_L < D_E$ ([Figure IV.30a](#)) et $D_E < D_L$ ([Figure IV.30b](#)) et la structure de coût en fonction des acteurs présentée au paragraphe [IV.4.1.2.3](#).

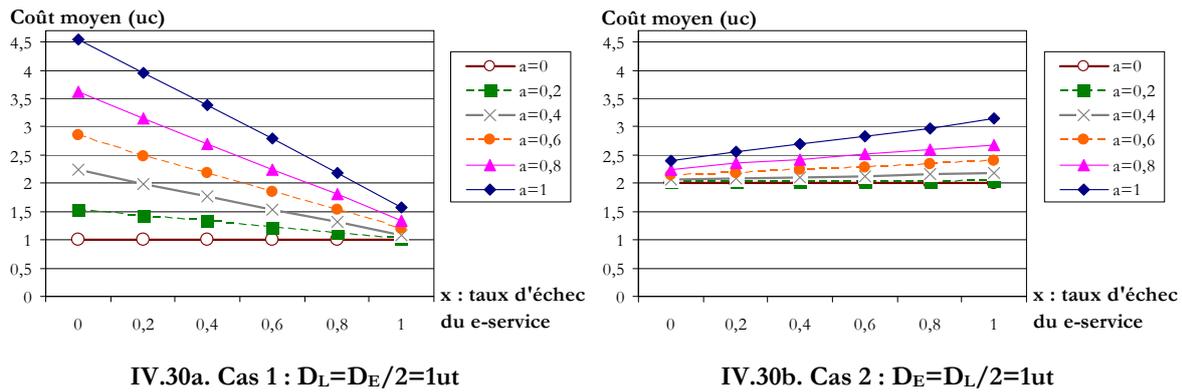


Figure IV.30. Évolution du coût moyen d'intervention pour les deux situations $D_L \neq D_E$

Les tracés de la Figure IV.30a traduisent globalement une diminution du coût de traitement lorsque le taux d'échec du e-service augmente ; ceci résulte de l'augmentation des traitements en local (dont la durée de traitement est moins élevée) avec l'augmentation du taux d'échec du e-service.

À l'inverse, les tracés de la Figure IV.30b correspondent à une augmentation du coût d'intervention, également provoquée par une augmentation des traitements en local où, dans cette situation, la durée de traitement est plus élevée. Les écarts entre les différents tracés sont moins importants que pour la Figure IV.30a car les coûts associés au mainteneur et à l'expert sont plus importants que celui de l'opérateur.

Là encore, la prise en considération de la qualité des interventions permet de compléter l'évaluation en termes de coût. Pour les tracés de la Figure IV.30a, les modes dégradés conduisant à des traitements en local sont à relier à la qualité des interventions simulées qui est de plus en plus dégradée lorsque le taux d'échec du e-service augmente.

Dans le cas, par exemple, d'une exigence : durée moyenne d'intervention inférieure à $2ut$ et coût moyen d'intervention inférieur à $2,5uc$, si les caractéristiques TIC sont telles que $x=0,2$ (taux d'échec du e-service de 20%), alors : pour la situation $D_E = D_L / 2 = 1ut$, toutes les formes de répartition des connaissances sont possibles tandis que pour la situation $D_L = D_E / 2 = 1ut$, la contrainte de durée exclut la répartition $a=1$ et la contrainte de coût exclut les répartitions $a > 0,4$.

Les résultats que nous venons d'établir considéraient une disponibilité totale des trois catégories d'acteurs. La prise en compte d'une indisponibilité possible des acteurs modifie évidemment ceux-ci. Nous donnons dans l'histogramme de la Figure IV.31 les résultats établis pour $a=0,8$ ($K_{TE}=80\%$) et les disponibilités suivantes d'acteurs : 100% pour l'opérateur, 50% pour le mainteneur et 10% pour l'expert (les acteurs pouvant être engagés dans un autre processus lors de l'occurrence d'une sollicitation).

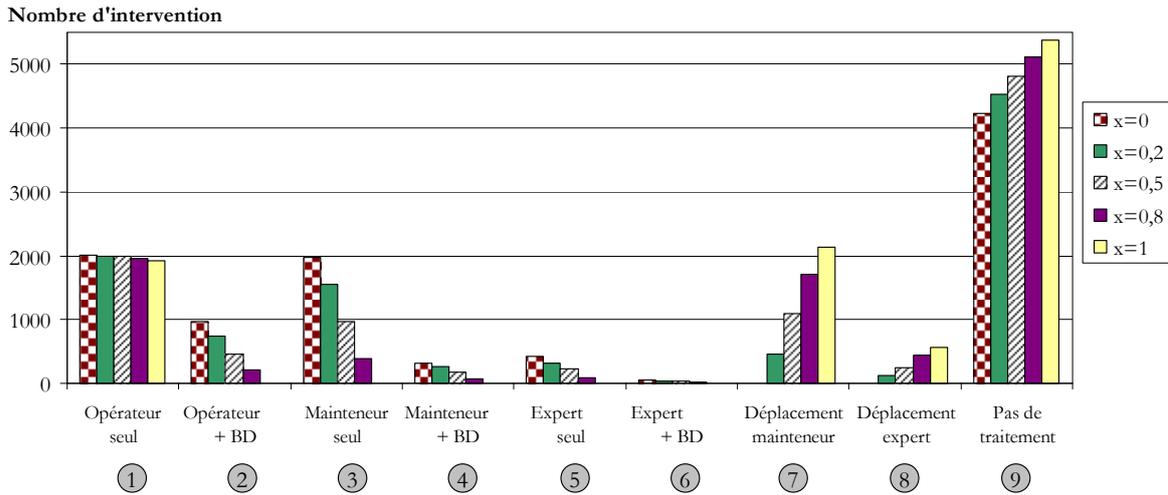


Figure IV.31. Histogramme des traitements avec $a=0,8$ et indisponibilité des acteurs

Sur la Figure IV.31, nous constatons une nette diminution de l'engagement du mainteneur et de l'expert comparé à la Figure IV.28. Cette diminution provoque une augmentation des interventions non traitées suite à l'indisponibilité des acteurs contactés dans les durées limites. Comme pour la situation de la Figure IV.28, un traitement en mode dégradé peut être envisagé pour les interventions non traitées.

Nous présentons sur la Figure IV.32 l'évolution du taux moyen d'interventions traitées en intégrant l'indisponibilité des acteurs.

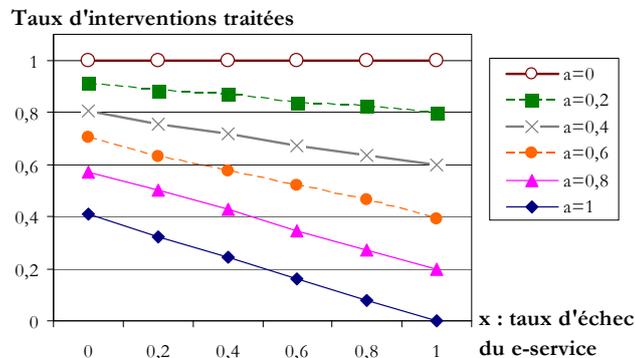


Figure IV.32. Évolution du taux d'interventions traitées avec indisponibilité des acteurs

Dès $x=0$, le taux d'interventions traitées est inférieur au cas précédent (Figure IV.27) aussitôt qu'il existe une externalisation même partielle. En effet, la prise en compte de l'indisponibilité des acteurs abaisse les performances aux capacités réelles du service de maintenance.

IV.4.1.4 Synthèse du simulateur MKBS

Par son caractère dédié, le simulateur MKBS (Maintenance Knowledge-Based Simulation) permet de simuler des scénarios de e-maintenance assez diversifiés.

Le simulateur, dont le fonctionnement est basé sur des scénarios de traitement de sollicitations d'intervention nous a permis d'évaluer les performances d'un service de maintenance par l'analyse des traitements des interventions en fonction de l'organisation du service, des connaissances disponibles et de leur distribution, du taux d'échec du e-service et de la disponibilité des acteurs.

Les résultats de simulation sont présentés sous forme d'abaques synthétiques facilitant leur utilisation pour un responsable de maintenance.

L'exploitation du simulateur peut aider à un dimensionnement global d'un service de maintenance en donnant, en fonction de tous ces paramètres, les lignes principales de l'organisation et de la distribution des connaissances entre le mode local et le mode externalisé.

IV.4.2 Modélisation par systèmes multiagents

Il nous a paru important, au-delà des deux plateformes de simulation utilisées, de considérer les potentialités des systèmes multiagents (SMA) pour modéliser et analyser les situations de décision collaborative.

En effet, le concept d'agent permet de modéliser des entités plus ou moins "intelligentes", autonomes et capables de collaborer ; un agent peut être assimilé à un centre de décision avec :

- des objectifs à atteindre (la fonction principale qu'il accomplit),
- des contraintes provenant de son environnement et des autres agents,
- des règles de fonctionnement interne lui permettant de communiquer et d'agir avec son environnement ou d'autres agents,
- des ressources lui permettant de remplir ses objectifs.

Le fonctionnement d'un SMA est basé sur la communication des agents ; c'est par leurs interactions que le système évolue et constitue une modélisation dynamique des échanges et collaborations des agents.

À l'aide des agents, nous pourrions définir les acteurs associés à des centres de décision ; ces entités vont communiquer, échanger des informations, des connaissances,... pour traiter les sollicitations de maintenance.

Nous avons retenu la plateforme libre *MadKit* (Multiagents development Kit) pour la simulation du SMA proposé. Nous proposons ces travaux en complément de la démarche principale ; ils sont présentés en [ANNEXE](#), à partir des principes de simulation présentés au paragraphe [IV.2](#).

Le SMA développé permet une modélisation dynamique des scénarios de e-maintenance considérés. Au cours des simulations, nous avons pu suivre et analyser en temps réel le déroulement des scénarios avec les échanges entre agents lors d'indisponibilité d'un agent ou lors de manque de connaissances d'un agent pour traiter une sollicitation, selon son niveau de complexité. Nous avons ainsi modélisé la collaboration et la négociation entre acteurs lorsqu'ils travaillent ensemble pour la réalisation d'une intervention.

Ces premiers éléments confirment les constats effectués suite aux simulations RdP et MKBS sur l'influence de l'indisponibilité d'un acteur (et de celles des TIC) ou de son manque de connaissances sur le traitement et sur la durée d'une sollicitation.

IV.5 RÈGLES DE BONNES PRATIQUES

Dans nos travaux, nous avons étudié la collaboration d'acteurs de maintenance via les TIC. Nous avons analysé la création d'un CDC (centre de décision collaboratif) à l'aide des principes de la méthode GRAI (cf. paragraphe III.3) et mené deux approches de simulation : les réseaux de Petri, outil de modélisation générique et la simulation dédiée par une approche de programmation objet. Ces travaux nous ont permis d'identifier des facteurs et des états conduisant à une amélioration ou à une dégradation des performances d'un service de maintenance instrumenté TIC.

De ces constats, nous avons déduit des règles de "bonnes pratiques" d'exploitation du e-service en maintenance afin d'en améliorer l'efficacité et l'efficacité.

Une bonne pratique est une action qui a pour objectif d'améliorer durablement la performance et qui peut être évaluée en termes de performance. Elle est validée par l'expérience et la mise en application dans des situations concrètes [Perrin 06].

L'ensemble des règles de bonnes pratiques visant à améliorer les interventions en e-maintenance peut être structuré en deux niveaux.

Un premier niveau d'application pratique constitué :

- des prérequis pour une bonne exploitation des ressources immatérielles accessibles via les TIC,
- des procédures et protocoles à respecter lors des interventions de maintenance,
- des règles de dimensionnement du service de maintenance.

Ce niveau correspond aux règles générales concernant les principaux éléments intervenant dans les activités de e-service.

Le deuxième niveau provient de l'analyse des résultats obtenus avec les simulations. Il s'inscrit dans une démarche d'accompagnement du travail des décideurs de maintenance.

Sans être exhaustif, voici les principales règles que nous proposons afin d'améliorer l'efficacité et l'efficacité d'un service de maintenance assisté par les TIC.

IV.5.1 Premier niveau

Tout d'abord, nous commençons par identifier les règles générales concernant les composants de la e-maintenance. Ces règles font suite à une analyse rationnelle des activités de e-maintenance, des difficultés, des améliorations possibles et des actions à éviter. Elles correspondent à des procédures, à des documents de travail ou à des fiches de poste permettant de guider les acteurs lors de l'utilisation des TIC et sont valides pour toutes activités de e-maintenance.

Reprenant les résultats du paragraphe II.3, nous avons considéré les composants suivants comme pouvant faire l'objet de règles :

- l'instrumentation TIC et le réseau servant de support aux échanges en maintenance,
- les catégories d'acteurs de la maintenance,
- les référentiels informatifs composés des bases de données (uniquement) stockant les connaissances et compétences explicites,
- les interventions de maintenance.

Concernant l'instrumentation TIC et le réseau :

- Employer des formats et protocoles d'échange compatibles.

- Mettre à disposition des acteurs, les outils TIC suffisants et nécessaires, en état de fonctionner.
- Définir des modes dégradés de fonctionnement pour pallier la défaillance des TIC ou du réseau.
- Employer un réseau permettant de garantir le niveau de sécurité requis.
- Mettre à disposition des acteurs suffisamment de points ou de modes de connexion au réseau pour garantir un accès aisé et rapide.
- Dimensionner le réseau pour garantir la capacité en termes de débit par rapport au volume moyen d'échange.
- Définir les profils d'utilisateurs en fonction des besoins en informations et des protocoles d'échange.

Concernant les référentiels informatifs :

- Centraliser la capitalisation des données et informations dans une seule base de données commune.
- Mettre en place une procédure de création et d'évolution des expériences, connaissances et compétences capitalisées.
- Ne mettre à disposition que des données qui ont été au préalable validées par un expert du domaine, sous le couvert du responsable du service.
- Réaliser des sauvegardes régulières.
- Cartographier le contenu des bases de données afin d'en faciliter l'exploitation.
- Contrôler les droits d'accès en fonction de la catégorie d'acteur (opérateur, mainteneur et expert) et du profil d'utilisateur.
- Actualiser régulièrement les référentiels pour garantir la validité et la pertinence des données.
- Employer des formalismes et des modes de représentation des connaissances compréhensibles par les acteurs pouvant être amenés à les exploiter.

Concernant les acteurs :

- Veiller à ce que les acteurs possèdent les compétences requises pour utiliser correctement les outils TIC mis à leur disposition. Au besoin, prévoir des campagnes de formation.
- Évaluer régulièrement les connaissances et compétences techniques des acteurs impliqués dans la maintenance.
- Fournir aux acteurs la cartographie des compétences tacites et explicites disponibles ainsi que leur localisation physique (acteurs ou bases de données).
- S'assurer que les acteurs sont capables de réaliser seuls des interventions sous le couvert d'une collaboration via les TIC.
- S'assurer que les acteurs sont capables de formuler et de transmettre leurs connaissances ou compétences à d'autres acteurs via les TIC.
- Vérifier que la collaboration via les TIC et leur utilisation sont conformes au cadre général défini par le responsable du service.
- Fournir aux acteurs les protocoles et procédures pour accéder au réseau.
- S'assurer que les acteurs connaissent et appliquent les règles de sécurité et de confidentialité liées aux échanges informatiques.
- Veiller à ne pas déstabiliser les acteurs par des changements ou des évolutions trop fréquents.

Concernant les interventions :

- Fournir pour chaque équipement ou famille d'équipements une typologie de défaillances (par niveau de complexité et par domaine).
- Définir les habilitations ou grades nécessaires pour traiter les niveaux de défaillances identifiés dans la typologie.
- Veiller à la cohérence entre le cadre général et l'affectation des niveaux de défaillances.
- Définir des procédures d'exception et leur cadre d'emploi.

Nous terminons ce premier niveau en considérant le dimensionnement de l'ensemble des activités devant être pilotées par le service de maintenance.

Concernant le dimensionnement de la e-maintenance (acteurs et bases de données) :

- Établir le prévisionnel du volume d'interventions (suivant la typologie des défaillances) à réaliser durant une période donnée et en déduire les connaissances et compétences requises.
- Évaluer le taux d'engagement des connaissances et compétences acquises en fonction de leur localisation (local/externalisé) et de leur stockage (acteur/référentiel informatif) pour couvrir le besoin requis en connaissances.
- Évaluer, de manière quantitative et qualitative, les ressources immatérielles externalisées et celles locales.
- Veiller à ne pas surcharger certaines ressources et à lisser la charge en fonction des prévisions.
- Veiller à garantir un taux de service minimal même en l'absence des TIC ou du réseau.
- S'assurer de la rentabilité de la solution mise en œuvre en fonction des contraintes terrain.
- Organiser les plages de présence des acteurs (astreintes) et de maintenance des bases de données pour garantir un taux de service minimal.

IV.5.2 Second niveau

Nous proposons un second type de règles directement inspirées des simulations réalisées au cours de ces travaux.

Pour les simulations, nous nous sommes appuyés sur deux types de paramètres : des données caractérisant l'état du service de maintenance et des leviers d'action permettant d'influencer l'organisation du service.

Nous avons identifié trois principales données : le taux d'échec du e-service, le taux de sollicitation du service de maintenance et la disponibilité des acteurs. Ces paramètres sont dépendants de l'instrumentation TIC pour le taux d'échec du e-service, du nombre et de l'état de fonctionnement des équipements à maintenir pour le taux de sollicitation.

Concernant les leviers d'action, nous avons considéré le taux d'externalisation des ressources immatérielles permettant d'influer sur la répartition des ressources immatérielles et sur l'engagement des acteurs. À partir du taux d'externalisation, il est possible d'agir sur la distribution quantitative et qualitative des ressources immatérielles mais également sur le nombre d'acteurs engagés entre le local et l'externalisé, sur leur niveau de connaissances,...

Nous donnons, là aussi, que quelques exemples de règles pouvant être extraites des simulations.

À partir des RdP, nous avons analysé l'influence de l'échec du e-service ou de l'indisponibilité d'acteurs externalisés. L'outil MKBS nous a permis d'étudier plus précisément les répartitions des connaissances

d'un service de maintenance et également l'influence de l'échec du e-service sur les traitements externalisés.

Quelques exemples de règles issues des simulations.

- Si le taux d'échec du e-service est élevé, alors privilégier une présence en local des ressources immatérielles :
 - . d'un point de vue quantitatif : laisser en local la majorité (le plus grand nombre) des ressources immatérielles,
 - . d'un point de vue qualitatif : laisser en local les ressources critiques, indispensables à certains traitements de sollicitation ou celles fréquemment utilisées.
- À l'inverse, si le taux d'échec du e-service est faible, alors externaliser :
 - . le plus grand nombre de ressources immatérielles,
 - . les plus importantes ou fréquemment utilisées.
- Considérer les coûts et durées associés aux ressources immatérielles pour évaluer précisément les possibles distributions avant d'effectuer des choix de répartition en mode local ou en mode externalisé.
- Considérer la disponibilité effective des acteurs : leur engagement dans des processus externes et leur accessibilité (leur disponibilité et celles des TIC) depuis le mode local avant de valider un choix d'externalisation d'acteur.
- Instrumenter le service de maintenance en fonction des sollicitations en spécifiant :
 - . un nombre de catégories d'acteurs (à chaque catégorie est associée une capacité de traitement fonction de la complexité des sollicitations),
 - . un nombre d'acteurs par catégorie.

Ces bonnes pratiques, même si nous présentons ici que quelques illustrations, constituent une application concrète de nos travaux. C'est à l'aide de ces règles que les améliorations des activités de e-maintenance peuvent être envisagées en venant directement en support du travail organisationnel des responsables de maintenance ou en étant associées aux outils d'aide à la décision assistant les acteurs dans leurs activités et dans leurs collaborations de plus en plus fréquentes.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons proposé une formulation théorique de la performance des activités de e-maintenance. À partir de cette formulation, nous avons développé plusieurs outils de simulation les réseaux de Petri, la programmation SMA et objet (conception de l'outil dédié MKBS). La simulation nous a permis d'illustrer cette formulation théorique de la performance en détaillant les étapes de modélisation des scénarios et en proposant des principes de réorganisation à des fins d'amélioration et d'optimisation des performances.

Ces trois approches sont complémentaires et ont apporté chacune des éléments à la modélisation de la performance des activités de e-maintenance.

Le réseau de Petri que nous avons développé nous a offert une première représentation théorique des scénarios de e-maintenance étudiés. À partir de ce réseau, nous avons construit les deux autres pistes de simulation.

Nous avons développé le simulateur MKBS en approfondissant les mécanismes de traitement des interventions de maintenance par plusieurs acteurs et en utilisant les outils de e-service (communication et accès à des connaissances distantes). Ce simulateur, avec son caractère dédié, nous a permis de spécifier une démarche de modélisation et de simulation de scénarios de e-maintenance, instanciable à d'autres situations similaires.

Le système multiagents que nous avons développé à l'aide de la plateforme MadKit nous ont aidé à formaliser les mécanismes d'échanges entre acteurs de maintenance et à spécifier les scénarios de traitement avec l'implication des trois catégories d'acteurs.

L'interprétation des premiers résultats de simulation obtenus à partir des RdP et de l'outil MKBS nous permettent d'envisager l'exploitation de ces simulateurs pour aider à l'organisation d'un service de maintenance et garantir ses performances avec l'intégration et l'utilisation de e-services. Nous avons montré que pour des paramètres donnés (coût, durée, taux d'échec du e-service,...) nous pouvons envisager une distribution globale des connaissances du service de maintenance entre le mode local, auprès de l'équipement à maintenir et le mode externalisé.

Les résultats issus des modélisations nous ont permis d'amorcer des règles de bonnes pratiques pour l'exploitation des e-services au sein d'une organisation afin d'en améliorer les performances. Ces règles peuvent s'intégrer dans une approche plus générale d'amélioration des décisions collaboratives en maintenance en agissant sur les ressources immatérielles et sur leur répartition.



CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont concerné les processus décisionnels collaboratifs des systèmes distribués, l'intégration des TIC à ces processus et l'amélioration de leurs performances. L'association des TIC aux processus décisionnels collaboratifs nous a ouvert de larges perspectives de recherche.

Notre étude a été appliquée à la fonction maintenance qui a subi fortement les évolutions technologiques provoquées par les TIC avec les nouvelles formes de maintenance, comme la e-maintenance. La maintenance a observé une profonde évolution de ses modes de travail, avec le travail à distance, les collaborations entre mainteneurs, ... tout en continuant à jouer son rôle clé de levier de performance des entreprises.

Concrètement, nos travaux de thèse sont répartis en trois parties.

La première partie était une synthèse des travaux scientifiques contribuant à renseigner dans différents domaines notre problématique.

La deuxième partie a concerné la modélisation des principaux éléments formant notre problématique : le contexte applicatif des activités de e-maintenance, les mécanismes de décision collaborative et les ressources immatérielles.

La troisième partie contient les éléments d'évaluation de performance que nous avons mis en place : la formulation de la répartition des connaissances afin d'évaluer les performances de scénarios de e-maintenance et la simulation de ces situations en vue d'établir des règles de bonnes pratiques sur l'intégration et l'utilisation des TIC au sein d'une organisation.

Synthèse bibliographique

La première partie de nos travaux est la synthèse bibliographique. Nous avons fait un état des travaux utiles à nos développements, existant dans les domaines de la maintenance, des TIC et de la décision collaborative.

Le premier domaine abordé est celui de la maintenance. Nous avons donné les principaux travaux de référence permettant de définir la fonction maintenance d'une entreprise. Nous avons également présenté les enjeux actuels de la maintenance avec les travaux scientifiques concernant les nouvelles formes et stratégies de maintenance. Nous avons ainsi constaté que les enjeux décisionnels et collaboratifs et les changements organisationnels provoqués par les TIC ne sont pas abordés ; seules les plateformes de e-maintenance illustrent les évolutions récentes initiées par les TIC.

Ensuite, nous avons abordé le domaine des TIC. Nous avons commencé par définir précisément les technologies auxquelles les TIC sont associées. Nous avons proposé une cartographie des effets des TIC présentés dans différents travaux scientifiques. Nous avons également présenté l'utilisation et l'intégration des TIC en maintenance. Cependant, les travaux abordant les effets négatifs et les

bouleversements provoqués par les TIC au sein d'une organisation ont été constatés encore peu nombreux.

Enfin, nous avons abordé les travaux concernant la décision collaborative. Nous avons d'abord évoqué les travaux traitant de la décision. Nous avons présenté les courants fondamentaux de recherche concernant les systèmes d'aide à la décision et les processus de décision. Nous avons réalisé ensuite une synthèse des différentes formes de travail collectif pour définir les phénomènes de coopération, de collaboration ou de codécision. Nous avons également analysé les travaux existants sur le couplage décision et collaboration. Ce mécanisme de décision collaborative est complexe à modéliser et peu de travaux proposaient des éléments précis pouvant nous être utiles. De même, l'étude de la décision collaborative en maintenance n'est abordée qu'au travers des plateformes de e-maintenance et de leur développement, sans considérer la puissance offerte par les TIC dans la disponibilité et l'accessibilité à des ressources immatérielles distantes.

Modélisation de la problématique étudiée et de ses enjeux immatériels

La deuxième partie a concerné la modélisation de la problématique étudiée, de son contexte applicatif et des enjeux de décision collaborative.

La modélisation proposée s'appuie sur des formalismes connus, compréhensibles par le plus grand nombre : la norme ISO 9001 et l'approche de modélisation objet. Le cadre normatif ISO nous a permis de proposer des développements robustes et compatibles avec le monde industriel.

Dans ce cadre normatif, nous avons proposé une approche de modélisation objet. Cette approche nous a permis de définir les composants clés, leur organisation statique et leur comportement dynamique. Nous avons ensuite proposé des indicateurs d'évaluation des performances des activités de e-maintenance qui ont été exploités plus loin, lors de la définition d'un cadre d'évaluation de performance (chapitre IV).

Nous avons approfondi le rôle des décideurs de maintenance en proposant une logique de regroupement des activités de décision collaborative, basée sur la modélisation GRAI. Notre approche est centrée sur les supports organisationnels des prises de décision. Nous avons analysé la collaboration de centres de décision via les TIC et les évolutions associées.

Les ressources immatérielles nécessaires aux prises de décision ont également été au centre de nos préoccupations. Nous avons proposé une modélisation des ressources immatérielles en associant une approche quantitative et une approche qualitative. L'association de ces deux approches de modélisation facilite la considération de ces ressources dans l'objectif d'évaluation des performances.

Formulation et évaluation des performances de scénarios de e-maintenance

La troisième partie de notre contribution a porté sur l'évaluation des performances des activités de e-maintenance. Nous avons proposé une formulation théorique de la performance en nous appuyant sur la répartition des connaissances nécessaires aux activités de e-maintenance. Cette répartition est réalisée entre le mode local, auprès de l'équipement à maintenir et le mode externalisé, accessible par le e-service. Nous avons établi un lien direct entre performance et disponibilité des connaissances.

À partir de cette formulation théorique, nous avons développé trois supports de simulation complémentaires : en utilisant les réseaux de Petri et, pour une simulation dédiée, l'approche objet et les systèmes multiagents.

Les réseaux de Petri nous ont permis une première représentation théorique des scénarios de e-maintenance étudiés. Ce réseau nous a servi de point de départ pour la simulation dédiée.

L'interprétation des premiers résultats de simulation a permis d'amorcer l'élaboration de règles de bonnes pratiques visant à améliorer les performances des activités de e-maintenance, l'intégration et l'utilisation des TIC lors de collaborations. Ces règles peuvent être utilisées par un responsable de maintenance pour une application directe des outils de simulation développés.

PERSPECTIVES

Ces travaux de recherche s'inscrivent selon nous clairement dans des tendances d'évolution des systèmes industriels actuels.

Il y a, tout d'abord, l'informatique ubiquitaire qui correspond à un dispositif informatique omniprésent, confortable à utiliser et inaperçu et qui concerne les moyens d'assistance ou de "dépannage" à distance permettant, par exemple, aux systèmes embarqués de rester en liaison avec toute l'expertise requise pour la réalisation d'une mission.

La spécialisation et l'augmentation de la technicité des équipements à maintenir requièrent une expertise pointue et des savoir-faire non communément communicables rendant nécessaires la collaboration d'acteurs par l'intermédiaire de plateformes de maintenance distribuées.

Une autre tendance qui s'accroît de plus en plus est le recentrage des entreprises sur leurs fondamentaux avec une externalisation de la maintenance impliquant souvent une liaison à distance avec le sous-traitant effectuant la maintenance via une "hotline".

Dans le cadre de cette intégration, nous identifions au moins quatre voies de développement pour approfondir ces travaux de recherche.

. Tout d'abord, il est nécessaire de poursuivre la "validation" des travaux par le traitement de situations plus élaborées. Un objectif important à ce niveau est d'identifier des invariants de situation qui conduiront à des primitives de modélisation et, ainsi, à l'établissement de bibliothèques de modèles intégrables aux outils d'aide à la décision. Les simulateurs proposés pourront être instrumentés à partir de ces bibliothèques de modèles et faire, à leur tour, partie d'une panoplie d'outils disponibles pour les décideurs.

. Une deuxième voie importante consiste à étendre les bonnes pratiques à partir des primitives de modèles. Nous envisageons l'établissement de bonnes pratiques de l'engagement des TIC dans des situations industrielles et, plus largement, celles d'optimisation des activités de e-maintenance basées sur une réorganisation des supports décisionnels et du déploiement des ressources immatérielles. L'intégration de ces règles à des outils d'aide à la décision usuels constitue également une piste à explorer.

. Il nous paraît important d'affiner davantage les mécanismes de collaboration via les TIC lors des regroupements de centres de décision : cadres de mission, référentiels communs de décision,...

instruisant de manière efficace les différentes formes de collaboration possibles. L'approfondissement des formes de collaboration peut aider à établir une typologie de situations de collaboration via les TIC détaillant les mécanismes de formation et de fonctionnement des centres de décision collaboratifs.

. Enfin, l'utilisation des SMA nous semble très prometteuse pour représenter et simuler des scénarios d'échange et de collaboration entre acteurs. La simulation dynamique offerte par les SMA pour la collaboration d'acteurs devrait en faire un outil pertinent dans ce type d'analyse.

Des améliorations du modèle développé sont prévues.

Le système de communication par envois directs de messages s'est avéré inadapté pour une évaluation précise des simulations. Un système de communication par tableau noir semble préférable ; il centralise les échanges en un seul agent et facilite ainsi l'évaluation du SMA. Avec ce type de communication, l'association d'une structure de coût et de durée permettra de compléter l'évaluation des simulations. La paramétrisation doit également être étendue en permettant bien sûr d'agir sur le nombre d'acteurs et de catégories d'acteurs, la fréquence des sollicitations,... mais également sur la caractérisation qualitative des ressources immatérielles modélisées, sur la couverture des sollicitations par les capacités de traitements des acteurs,...



BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Adam 00] Adam E., "Modèle d'organisation multi-agent pour l'aide au travail coopératif dans les processus d'entreprises : application aux systèmes administratifs complexes", *Thèse de doctorat*, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2000.
- [Adzakpa 04] Adzakpa K. P., Adjallah K. H., Yalaoui F., "On-line maintenance job scheduling and assignment to resources in distributed systems by heuristic-based optimization", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15 (2), p. 131-140, 2004.
- [Afnor 01] *Norme AFNOR NF EN 13306*, "Terminologie de la maintenance" (ancienne norme NF X60-010), Ed. Afnor, Paris, 2001.
- [Afnor 02] *Norme AFNOR X 60-000*, "Maintenance industrielle - Fonction maintenance", Ed. Afnor, Paris, 2002.
- [Afnor 02b] *Norme AFNOR X 50-183*, "Outils de management - Ressources humaines dans un système de management de la qualité - Management des compétences", Ed. Afnor, Paris, 2002.
- [Afnor 82] *Norme AFNOR X 60-301*, "Guide pour la prise en compte des critères de maintenabilité des biens durables à usage industriel et professionnel", Ed. Afnor, Paris, 1982.
- [Afnor 88] *Norme AFNOR X 60-500*, "Terminologie relative à la fiabilité - Maintenabilité - Disponibilité", Ed. Afnor, Paris, 1988.
- [Aghezzaf 07] 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*, 181 (2), p. 679-685, 2007.
- [Al-Taitoon 04] Al-Taitoon A., Sorensen C., "Supporting mobile professionals in global banking: the role of global ICT-support call-centres", *37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'04)*, Hawaii, USA, 2004.
- [Ammar 04] Ammar A., "L'impact de l'ERP sur la prise de décision", *9e colloque de l'Association, Information et Management (AIM)*, Evry, France, 2004.
- [Anke 05] Anke J., Främling K., "Distributed Decision Support in a PLM scenario", *14th Symposium on Product Data Technology*, Amsterdam, Netherlands, 2005.
- [Anthony 65] Anthony R. N., "Planning and control systems: a framework for analysis", *Ph.D. Thesis*, Graduate School of Business Administration, Harvard University, 1965.
- [Anumba 02] Anumba C. J., Ugwu O. O., Newnham L., Thorpe A., "Collaborative design of structures using intelligent agents", *Automation in Construction*, 11 (1), p. 89-103, 2002.
- [Banâtre 91] Banâtre J. P., Banâtre M., *Les systèmes distribués : expérience du Projet GOTHIC*, InterEditions, Coll. Sciences Informatiques, ISBN 2-7296-0242-9, 1991.
- [Bangemann 06] 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*, 57 (6), p. 539-551, 2006.
- [Bannon 89] Bannon L. J., Schmidt K., "CSCW: Four Characters in Search of a Context", *1st European Conference on Computer Supported Cooperative Work (ECSCW '89)*, London, UK, p. 358-372, 1989.
- [Barabel 96] Barabel M., "Un style de décision à la française", *Revue française de gestion*, p. 159-170, 1996.
- [Bardram 98] Bardram J., "Designing for the Dynamics of Work Activities Cooperative", *Conference on Computer Supported Cooperative Work (ACAA)*, Seattle, Washington, USA, 1998.
- [Baumard 96] Baumard P., *Organisations déconcertées : la gestion stratégique de la connaissance*, Ed. Masson, ISBN 2-225-85170-0, 1996.

- [Bayart 05] Bayart M., Conrad B., Chovin A., Robert M., "Capteurs et actionneurs intelligents", *Techniques de l'Ingénieur*, S 7520, 2005.
- [Bellut 02] Bellut S., *Les processus de la décision : Démarches, méthodes et outils*, Ed. AFNOR, Paris, ISBN 2-12-475054-2, 2002.
- [Ben Salem 08] Ben Salem R., Grangel R., Bourey J.-P., "A comparison of model transformation tools: Application for Transforming GRAI Extended Actigrams into UML Activity Diagrams", *Computers in Industry*, 59 (7), p. 682-693, 2008.
- [Benali 03] Benali K., Bourguin G., David B., Derycke A., Ferraris C., "Collaboration / Coopération", *Actes des 2^e Assises nationales du GdR I3*, 2003.
- [Benaouda 06] Benaouda A., Zerhouni N., Varnier C., "Une approche multi-agents coopératifs pour la gestion des ressources matérielles dans un contexte multi-sites de e-manufacturing", *6^e Conférence Francophone (MOSIM'06)*, Rabat, Maroc, ISBN 2-7430-0893-8, 2006.
- [Benghozi 00] Benghozi P.-J., Flichy P., D'Iribarne A., "Le développement des NTIC dans les entreprises françaises", *Réseaux*, 104, 2000.
- [Benmounah 05] Benmounah A., "Optimisation des périodicités de contrôle, d'essais et d'entretien préventif des machines", *4^e conférence internationale sur la conception et production intégrées (CPI'2005)*, Casablanca, Maroc, 2005.
- [Bennour 07] Bennour M., Crestani D., "Using competencies in performance estimation: from the activity to the process", *Computers in Industry*, 58 (2), p. 151-163, 2007.
- [Berchet 00] Berchet C., "Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel", *Thèse de doctorat*, INP de Grenoble, 2000.
- [Berger 00] Berger C., Guillard S., *La rédaction graphique des procédures*, Ed. AFNOR, ISBN 2-12-465045-9, 2000.
- [Berrah 02] Berrah L., *L'indicateur de performance : concepts et applications*, Ed. Cépaduès, ISBN 2-85428-567-0, 2002.
- [Besseyre 06] Besseyre des Horts C.-H., Isaac H., Leclercq A., "Les conséquences paradoxales de l'usage des outils mobiles de communication sur les situations perçues de travail : une étude exploratoire sur l'impact humain et organisationnel des technologies mobiles", *XVII^e Congrès de l'AGRH - Le travail au cœur de la GRH*, Reims, France, 2006.
- [Betbeder 03] Betbeder-Matibet M. -L., "Symba : un environnement malléable support d'activités collectives en contexte d'apprentissage", *Thèse de doctorat*, Université du Maine, 2003.
- [Bhargava 07] Bhargava H. K., Power D. J., Sun D. "Progress in Web-based decision support technologies", *Decision Support Systems*, 43 (4), p.1083-1095, 2007.
- [Bierlaire 07] Bierlaire M., Crittin F., Thémans M., "Continuous Optimization - A multi-iterate method to solve systems of nonlinear equations", *European Journal of Operational Research*, 183 (1), p. 20-41, 2007.
- [Bitouzet 97] Bitouzet C., Fournier P., Tezenas du Montcel B., *Management et Intranet*, Ed. Hermès, Paris, ISBN 2-86601-591-6, 1997.
- [Bitton 90] Bitton M., "ECOGRAI, méthode de conception et d'implantation de systèmes de mesure de performances pour organisations industrielles", *Thèse de doctorat*, Université de Bordeaux I, 1990.
- [Blanc 07] Blanc S., Ducq Y., Vallespir B., "Evolution management towards interoperable supply chains using performance measurement", *Computers in Industry*, 58 (7), p. 720-732, 2007.
- [Bonjour 02] Bonjour E., Dulmet M., "Articulation entre pilotage des systèmes de compétences et gestion des connaissances", *1^{er} colloque de gestion des compétences et des connaissances en génie industriel*, Nantes, France, p 43-50, 2002.
- [Booch 00] Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I., *Le guide de l'utilisateur UML*, Ed. Eyrolles, Paris, ISBN 2-212-09103-6, 2000.
- [Boucher 03] Boucher X., "Vers l'intégration des compétences dans le pilotage des performances de l'entreprise", *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 37 (3), p. 363-390, 2003.
- [Boujut 02] Boujut J. F., Cavaillé J. B. & Jeantet A., "Instrumentation de la coopération". Dans *Coopération et connaissance dans les systèmes industriels* sous la direction de R. Soënen et J. Perrin, p. 91-109. Lavoisier, Hermès Science, 2002.
- [Boumane 06] Boumane A., Talbi A., Tahon C., Bouami D., "Contribution à la modélisation de la compétence", *6^e conférence francophone de Modélisation et SIMulation (MOSIM'06)*, Rabat, Maroc, ISBN 2-7430-0893-8, 2006.

- [Bounfour 03] Bounfour A., "The IC-dVAL approach", *Journal of Intellectual Capital*, 4 (3), p. 396 - 413, 2003.
- [Bowden 06] Bowden S., Dorr A., Thorpe T., Anumba C., "Mobile ICT support for construction process improvement", *Automation in Construction*, 15 (5), p. 664-676, 2006.
- [Brams 83] Brams G. W., André C., Berthelot G. (ouvrage collectif), *Réseaux de Petri : théorie et pratique* (2 tomes), Ed. Masson, Paris, ISBN 2-903607-12-5 (t. 1), ISBN 2-903607-13-3 (t. 2), 1983.
- [Brandenburg 03] Brandenburg H., Wojtyna J.-P., *L'approche processus, mode d'emploi*, Ed. d'Organisation, ISBN 2-7081-2888-4, 2003.
- [Bressy 05] Bressy P., Zerhouni N., Allemand C., Leger J.-B., "Application du concept de e-maintenance à un système naval de défense : NEMOSYS", *2^e Colloque international francophone sur la Performance et les Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM'05)*, Marrakech, Maroc, 2005.
- [Breuil 84] Breuil A. D., "Outil de conception et de décision dans les organisations de gestion de production", *Thèse de doctorat*, Université de Bordeaux 1, 1984.
- [Briot 89] Briot J. P., "Actalk : une plate-forme de modélisation des langages acteurs en Smalltalk-80", *7^e congrès reconnaissances des formes et intelligence artificielle (RFLA'89)*, Paris, France, p. 147-162, 1989.
- [Bris 03] Bris R., Chatelet E., Yalaoui F., "New method to minimize preventive maintenance cost of series - parallel systems", *Reliability Engineering and System Safety*, 82 (3), p. 247-255, 2003.
- [Brown 99] Brown J., McCarragher B. J., "Maintenance resources allocation using decentralised co-operative control", *Proceedings of Information, Decision and Control (IDC 99)*, ISBN 0-7803-5256-4, 1999.
- [Buhalis 04] Buhalis D., "eAirlines: strategic and tactical use of ICTs in the airline industry", *Information & Management*, 41 (7), p. 805-825, 2004.
- [Burlat 01] P. Burlat, X. Boucher, "Piloteage distribué des groupements d'entreprises - Modélisation et perspectives", *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 35 (7-8), p. 991-1018, 2001.
- [Capek 01] Capek J., "Petri Net Simulation of Non-deterministic MAC Layers of Computer Communication Networks", *PhD Thesis*, Faculty of Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, 2001.
- [Carlsson 04] Carlsson S. A., "Enhancing Knowledge Acquisition through the use of ICT", *Decision Support in an Uncertain and Complex World: The IFIP TC8/WG8.3 International Conference*, Prato, Italy, 2004.
- [Cauvin 05] 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 92] Cérutti O., Gattino B., *Indicateurs et tableaux de bord*, Ed. AFNOR (3^{ème} édition en 1997), Série Gestion, Qualité, ISBN 2-12-488111-6, 1992.
- [Chakhar 06] Chakhar S., "Cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique", *Thèse de doctorat*, Université de Paris Dauphiné, 2006.
- [Charbit 02] Charbit C., Fernandez V., "Les trajectoires d'adoption des TIC dans les systèmes productifs localisés : vers des communautés virtuelles ?", *Workshop "TIC et réorganisation spatiale des activités économiques"*, Brest, France, 2002.
- [Chartron 94] Chartron G., "Nouvelles technologies et organisations de travail coopératif : quelques repères", *Solaris*, 1, 1994.
- [Chelbi 06] Chelbi A., Bennour M. R., Zerhouni N., "Contribution à la modalisation des approches de coopération en e-maintenance", *6^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'06)*, Rabat, Maroc, ISBN 2-7430-0893-8, 2006.
- [Chen 97] Chen D., Vallespir B., Doumeings G., "GRAI integrated methodology and its mapping onto generic enterprise reference architecture and methodology", *Computers in Industry*, 33 (2-3), p. 387-394, 1997.
- [Chim 04] Chim M. Y., Anumba C. J., Carrillo P. M., "Internet-based collaborative decision-making system for construction", *Advances in Engineering Software*, 35 (6), p. 357-371, 2004.
- [Chiu 02] Chiu. M.-L., "An organizational view of design communication in design collaboration", *Design Studies*, 23 (2), p. 187-210, 2002.

- [Cho 04] Cho H., Kulvatunyou B., Jeong H., Jones A., "Using business process specifications and agents to integrate a scenario-driven supply chain", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17 (6), p. 546-560, 2004.
- [Cissé 99] Cissé, A., Ndiaye, S., Link-Pezet J., Martin R., "Travail en réseau et intelligence économique", *Solaris*, 5, 1999.
- [Clermont 07] Clermont P., Beler C., Rakoto H., Desforges X., Geneste L., "Capitalisation et Retour d'expérience: un raisonnement à partir de cas étendu aux systèmes socio-techniques", Chapitre 12 de l'ouvrage *Raisonnement à partir de cas - Vol. 2: Surveillance, Diagnostic et Maintenance*, by Renaud J., Chebel Morello B., Fuchs B., Lieber J., Ed. Hermès, Lavoisier, Paris, ISBN 978-2-7462-1550-4, 2007.
- [Collins 92] Collins H. M., *Experts Artificiels, Machines Intelligentes Et Savoir Social*, Ed. du Seuil, Paris, Collection Science Ouverte, ISBN 2-0201-4751-3, 1992.
- [Combes 98] Combes C., Lamure M., "Système d'aide à la décision pour des systèmes de santé : Méthodologie de modélisation orientée objets à l'aide d'une approche multi-agents", 2^e journée "Acteurs, Agents et Apprentissage", 1998.
- [Coudert 99] Coudert T., Archimède B., Grabot B., "Un système multi-agents pour la coopération production / maintenance", 2^e conférence francophone de Modélisation et SIMulation (MOSIM'99), Annecy, France, ISBN 1-5555-176-1, 1999.
- [Courbon 82] Courbon J.-C., "Processus de décision et aide à la décision", *Économies et Sociétés*, 16 (12), p. 1455-1476, 1982.
- [Cucchi 04] Cucchi A., "Pratiques relationnelles et usages des technologies de l'internet : le cas des entreprises réunionnaises", 9^e colloque de l'Association, Information et Management (AIM), Evry, France, 2004.
- [Cullen 00] Cullen P. A., "Contracting co-operative relations and extended enterprises", *Technovation*, 20 (7), p. 363-372, 2000.
- [Daclin 06] Daclin N., Chen D., Vallespir B., "Decisional interoperability: concepts and formalisation", *IFIP International Federation for Information Processing Network-Centric Collaboration and Supporting Fireworks*, eds. Camarinha-Matos, L., Afsarmanesh, H., Ollus, M., Ed. Springer, Boston, 224, p. 297-304, 2006.
- [Dameron 03] Dameron, S. "Structuration de la coopération au sein d'équipes projet", *XIIe Conférence Annuelle de l'Association Internationale de Management Stratégique*, Les Côtes de Carthage, Tunisie, 2003.
- [David 97] David B., Gibaud O., Roland J.-P., Tarpin-Bernard F., "Cooperative learning Systems: Extension of the micro-world concept", *Conference on Telecommunications for Education and Training*, Prague, p. 48-54, mai 1997.
- [De Michelis 95] De Michelis G., "Computer Support for Cooperative Work: Computers between Users and Social Complexity", in Bagnara, S., Zuccheromaglio, C., Stucky, S. (Eds.), *Organizational Learning and Technological Change*, Springer, Berlin, 1995.
- [De Terssac 96] Ouvrage collectif sous la direction de De Terssac G., Friedberg E., *Coopération et conception*, Ed. Octarès, Toulouse, ISBN 2-906769-33-9, 1996.
- [Despontin 04] Despontin - Monsarrat E., "Aide à la décision pour une coopération inter-entreprises dans le cadre de la production à la commande", *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2004.
- [Despujols 05] Despujols A., "Méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance", *Techniques de l'Ingénieur*, MT 9 050, 2005.
- [Dieng 00] Dieng R., Corby O., Giboin A., Golebiowska J., Matta N., Ribière M., *Méthodes et outils pour la gestion des connaissances*, Ed. DUNOD, Coll. Informatiques, Paris, ISBN 2-10-004574-1, 2000.
- [Dieng 98] Dieng R., Corby O., Giboin A., Ribière M., "Methods and Tools for Corporate Knowledge Management", *11th Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management Voyager (KAW'98)*, Banff, Alberta, Canada, 1998.
- [Dillenbourg 96] Dillenbourg, P., Baker, M., Blaye, A., & O'Malley, C., "The evolution of research on collaborative learning", In P. Reimann & H. Spada (Eds.), *Learning in humans and machines: Towards an interdisciplinary learning science*, Oxford: Pergamon, 1996.
- [Doumeingts 84] Doumeingts G., "Méthode GRAI : Méthode de conception en productique", *Thèse de doctorat d'État*, Université de Bordeaux 1, 1984.

- [Ducq 04] Ducq Y., Chen D., Vallespir B., "Interoperability in enterprise modelling: requirements and roadmap", *Advanced Engineering Informatics*, 18 (4), p. 193-203, 2004.
- [Ducq 05] Ducq Y., Vallespir B., "Definition and aggregation of a performance measurement system in three aeronautical workshops using the ECOGRAI method", *Production Planning & Control*, 16 (2), p. 163-177, 2005.
- [Dudezert 06] Dudezert A., Lancini A., "Performance et Gestion des Connaissances: Contribution à la construction d'un cadre d'analyse", *Journées des LAE, Congrès du cinquantenaire*, Montpellier, France, 2006.
- [Dufresne 03] Dufresne A., Basque J., Paquette G., Léonard M., Lundgren-Cayrol K., Prom Tep S., "Vers un modèle générique d'assistance aux acteurs du téléapprentissage", *Revue Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation (STICEF)*, 10, 2003.
- [Dumont 01] Dumont L., Morel L., "Modélisation des coûts de maintenance : application sur l'installation d'expérimentation AIRIX", *3^e Conférence Francophone de Modélisation et de Simulation (MOSIM'01)*, Troyes, France, ISBN 1-56555-212-1, 2001.
- [Dustdar 03] Dustdar S., Gall H., "Architectural concerns in distributed and mobile collaborative systems", *Journal of Systems Architecture*, 49 (10-11), p. 457-473, 2003.
- [DYNAMITE 05] *DYNAMITE "Dynamic Decisions in Maintenance"*, FP6 Integrated Project IP 017498 of the European Commission, 6th Framework programme for Research and Technological Development, 2005-2009.
- [Eichner 05] Eichner C., Fleischhack H., Meyer R., Schimpf U., Stehno C., "Compositional Semantics for UML 2.0 Sequence Diagrams Using Petri Nets", *Lecture Notes in Computer Science, ed.: SDL 2005: Model Driven Systems Design: 12th International SDL Forum*, Grimstad, Norway, 3530, p. 133-148, 2005.
- [Elegbede 03] Elegbede C., Adjallah K., "Availability allocation to repairable systems with genetic algorithms: a multi-objective formulation", *Reliability Engineering and System Safety*, 82 (3), p. 319-330, 2003.
- [Ellis 91] Ellis C. A., Gibbs S. J., Rein G. L., "Groupware: some issues and experiences", *Communication of the ACM*, 34 (1), 1991.
- [Ermine 03] Ermine J.-L., *La gestion des connaissances*, Ed. Hermès, Lavoisier, Paris, ISBN 2-7422-0660-9, 2003.
- [Ermine 96] Ermine J.-L., *Les systèmes de connaissances*, Ed. Hermès, ISBN 2-8660-1526-6, 1996.
- [Erschler 76] Erschler J., "Analyse sous contraintes et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement", *Thèse d'état*, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1976.
- [Fauré 07] Fauré B., Pernin J.-L., Girard F., "La pédagogie par les jeux d'entreprises. Dynamique de groupe et incertitude lors des délibérations collectives des étudiants", *4^e Colloque sur les "Questions de pédagogies dans l'enseignement supérieur"*, Louvain-la-neuve, France, 2007.
- [Ferber 95] Ferber J., *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, InterEditions, ISBN 2-7296-0572-X, 1995 (réédité en 1997).
- [Ferber 98] Ferber J., Gutknecht O., "A meta-model for the analysis and design of Organizations in multi-agent systems", *IEEE International Conference on Multi Agent Systems (ICMAS'98)*, Paris, France, ISBN 0-8186-8500-X, p. 128-135, 1998.
- [Fermeuse 03] Fermeuse C., "Mise en œuvre de la télémaintenance au Centre d'Excellence en Maintenance Industrielle (CEMI)", *1^{er} Colloque international francophone sur la Performance et les Nouvelles TechnOlogies en Maintenance (PENTOM'03)*, Valenciennes, France, 2003.
- [Fiori 06] Fiori de Castro H., Lucchesi Cavalca K., "Maintenance resources optimization applied to a manufacturing system", *Reliability Engineering and System Safety*, 91 (4), p. 413-420, 2006.
- [FIPA ACL 02] Document collectif, "FIPA ACL Message Structure Specification", *SC00061G*, Foundation for Intelligent Physical Agents <http://www.fipa.org>, 2002.
- [FIPA Contract-net 02] Document collectif, "FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification", *SC00029H*, Foundation for Intelligent Physical Agents <http://www.fipa.org>, 2002.
- [Forest 97] Forest J., Micaëlli J. P., Perrin J., "Innovation et conception : pourquoi une approche en terme de processus ?", *2^e Congrès International de Génie Industriel (CIGI'97)*, Albi, France, ISBN 2-9511591-0-2, 1997.

- [Fu 04] Fu Q. Y., Ping C. Y., Helander M. G., "Knowledge-based Collaborative Decision Making System for Product Design", *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, Singapore, 2004.
- [Galasso 07] Galasso F., "Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible", *Thèse de doctorat*, INP de Toulouse, 2007.
- [Gallié 02] Gallié E.-P., "Une grille d'analyse de l'usage des TIC dans les différentes étapes de la coopération technologique", *Journées des doctorants, GDR TIC*, 2002.
- [Garcia 04] Garcia E., Guyennet H., Lapayre J. C., Zerhouni N., "A new industrial cooperative tele-maintenance platform", *Computers & Industrial Engineering*, 46 (4), p. 851-864, 2004.
- [Garcia 06] Garcia A., Noyes D., "Impact des technologies d'information et de communication sur un système décisionnel : cas de la maintenance", *6^e Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation (MOSIM'06)*, Rabat, Maroc, ISBN 2-7430-0893-8, p. 1110-1119, 2006.
- [Garcia 07] Garcia A., Noyes D., Clermont P., "Performances des situations de e-maintenance", *7^e Congrès International de Génie Industriel (CIGI'07)*, Trois-Rivières, Québec, Canada, 2007.
- [Garcia 08] Garcia A., Noyes D., Clermont P., "Knowledge distribution in e-maintenance activities", *IFIP International Conference on Collaborative Decision Making (CDM'08)*, Toulouse, France, Ed. IOS Press by Zaraté P., Belaud J.-P., Camilleri G., Ravat F., ISBN 978-1-58603-881-6, p. 344-355, 2008.
- [Gardoni 99] Gardoni M., "Maîtrise de l'information non structurée et capitalisation de savoir et savoir-faire en Ingénierie intégrée : Cas d'étude Aérospatiale", *Thèse de doctorat*, Université de Metz, 1999.
- [Gavirneni 01] Gavirneni S., "Benefits of co-operation in a production distribution environment", *European Journal of Operational Research*, 130 (3), p. 612-622, 2001.
- [George 01] George S., "Apprentissage collectif à distance. SPLACH: un environnement informatique support d'une pédagogie de projet", *Thèse de doctorat*, Université du Maine, 2001.
- [Germain 98] Germain M., *L'Intranet*, Ed. Économica, Paris, ISBN 2-7178-3698-5, 1998.
- [Ghelam 05] Ghelam-Allah S., Simeu-Abazi Z., Derain J.-P., Feuillebois C., Vallet S., "Architecture de surveillance et diagnostic pour la maintenance des systèmes avioniques", *2^e Colloque international francophone sur la Performance et les Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM'05)*, Marrakech, Maroc, 2005.
- [Giard 88] Giard V., *Gestion de la production*, Ed. Économica, ISBN 2-7178-1527-9, 1988.
- [Gibert 80] Gibert P., *Le contrôle de gestion dans les organisations publiques*, Ed. d'Organisation, Coll. Management public, ISBN 2-70-810416-0, 1980.
- [Girard 06] P. Girard, V. Robin, "Analysis of collaboration for project design management", *Computers in Industry*, 57 (8-9), p. 817-826, 2006.
- [Gomes 06] Lima Gomes R., "LEICA : Un environnement faiblement couplé pour l'intégration d'applications collaboratives", *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier, 2006.
- [Gouriveau 04] Gouriveau R., Noyes D., "Risk management – dependability tools and case-based reasoning integration using the object formalism", *Computers in Industry*, 55 (3), p. 255-267, 2004.
- [Gretton 04] Gretton P., Gali J., "Effects of ICT Use on the Performance of Australian Firms: Evidence from a Business Longitudinal Data Set", *Asia-Pacific Productivity Conference (APPC2004)*, Brisbane, Australia, 2004.
- [Grundstein 95] Grundstein M., "La capitalisation des connaissances de l'entreprise, système de production des connaissances", *Colloque "l'entreprise apprenante et les sciences de la complexité"*, Aix-en-Provence, France, 1995.
- [Gunasekaran 06] Gunasekaran A., Ngai E. W. T., McGaughey R. E., "Information technology and systems justification: A review for research and applications", *European Journal of Operational Research*, 173 (3), p. 957-983, 2006.
- [Gutknecht 01] Gutknecht O., "Proposition d'un modèle organisationnel générique de systèmes multi-agents - Examen de ses conséquences formelles, implémentatoires et méthodologiques", *Thèse de doctorat*, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 2001.
- [Gzara 06] Gzara Yesilbas L., Rose B., Lombard M., "Specification of a repository to support collaborative knowledge exchanges in IPPOP project", *Computers in Industry*, 57 (8-9), p. 690-710, 2006.

- [Hadj 04] Hadj-Hamou K., Caillaud E. "Cooperative design: a framework for a competency-based approach", *5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME)*, Bath, UK, 2004.
- [Han 06] Han T., Yang B.-S., "Development of an e-maintenance system integrating advanced techniques", *Computers in Industry*, 57 (6), p. 569-580, 2006.
- [Harzallah 00] Harzallah M., "Modélisation des aspects organisationnels et des compétences pour la réorganisation d'entreprises industrielles", *Thèse de doctorat*, École Nationale d'Ingénieurs de Metz, 2000.
- [Harzallah 02] Harzallah M., Vernadat F., "IT-based competency modeling and management: from theory to practice in enterprise engineering and operations", *Computers in Industry*, 48 (2), p. 157-179, 2002.
- [Hatami 03] Hatami A., Galliers R. D., Huang J., "Exploring the Impacts of Knowledge (Re) Use and Organizational - Memory on the Effectiveness of Strategic Decisions: A Longitudinal Case Study", *36th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03)*, Hawaii, USA, 2003.
- [Hayes-Roth 85] Hayes-Roth B., "A blackboard architecture for control", *Artificial Intelligence*, 26 (3), p. 251-321, 1985.
- [Hazebroucq 03] Hazebroucq V., "Rapport sur l'état des lieux, en 2003, de la télémédecine française", *Rapport établi pour le Ministère de la recherche et des nouvelles technologies*, 2003.
- [He 06] He F., Han S., "A method and tool for human-human interaction and instant collaboration in CSCW-based CAD", *Computers in Industry*, 57 (8-9), p. 740-751, 2006.
- [Hermosillo 05] Hermosillo W. J., Chatha K. A., Weston R. H., Aguirre O., Grabot B., "Implementation and optimisation of ERP systems: A better integration of processes, roles, knowledge and user competencies", *Computers in Industry*, 56 (6), p. 620-638, 2005.
- [Hétreux 96] Hétreux G., "Structure de décision multi-niveaux pour la planification de la production : robustesse et cohérence des décisions", *Thèse de doctorat*, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 1996.
- [Holliman 06] Holliman R., Scanlon E., "Investigating cooperation and collaboration in near synchronous computer mediated conferences", *Computers & Education*, 46 (3), p. 322-335, 2006.
- [Huet 04] Huet F., "Apprentissage collectif et dynamique coopérative : Une étude empirique des PME françaises", *Thèse de doctorat*, Université de Technologie de Compiègne, 2004.
- [Hung 03] Hung M.-H., Chen K.-Y., Ho R.-W., Cheng F.-T., "Development of an e-Diagnostics/Maintenance framework for semiconductor factories with security considerations", *Advanced Engineering Informatics*, 17 (3-4), p. 165-178, 2003.
- [Isaac 07] Isaac H., Campoy E., Kalika M., "Surcharge informationnelle, urgence et TIC - L'effet temporel des technologies de l'information", *Management & Avenir*, 13, p. 153-172, 2007.
- [ISO 62264] *Norme IEC 62264-1*, "Intégration du système de conduite d'entreprise - Partie 1 : Modèle et terminologie", 2003.
- [ISO 9001 00] *Norme NF EN ISO 9001 (X50-131)*, "Systèmes de Management de la qualité, Exigences", 2000.
- [Jung 06] Jung B., Crespo Marquez A., Editorial "Special issue on e-maintenance", *Computers in Industry*, 57 (6), p. 473-475, 2006.
- [Ivanov 03] Ivanov A., Vernier C., Zerhouni N., "Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué", *4^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'03)*, Toulouse, France, ISBN 2-7430-0731-1, 2003.
- [Jankovic 06] Jankovic M., "Prise des décisions collaboratives dans le processus de conception de nouveaux produits. Application à l'automobile", *Thèse de doctorat*, École Centrale Paris, 2006.
- [Jaziri 04] Jaziri W., "Modélisation et gestion des contraintes pour un problème d'optimisation sur-constraint : application à l'aide à la décision pour la gestion du risque de ruissellement", *Thèse de doctorat*, INSA de Rouen, 2004.
- [Jennings 01] Jennings N. R., Faratin P., Lomuscio A. R., Parsons S., Sierra C., Wooldridge M., "Automated Negotiation: Prospects, Methods and Challenges", *Int. Journal of Group Decision and Negotiation*, 10 (2), p. 199-215, 2001.

- [Jennings 98] Jennings N. R., Sycara K., Wooldridge M., "A Roadmap of Agent Research and Development", *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1 (1), p. 7-38, 1998.
- [Jermann 99] Jermann P., Dillenbourg P., "An analysis of learner arguments in a collective learning environment", *Conference Computer Support for Collaborative Learning (CSCL)*, Stanford University, USA, p. 265-273, 1999.
- [Jia 98] Jia T., "Vers une meilleure gestion des ressources d'un groupe autonome de fabrication", *Thèse de doctorat*, Université de Tours, 1998.
- [Johansen 89] Johansen R., "Groupware and Collaborative Systems", *IEEE Conference on Global Telecommunications and Exhibition (GLOBECOM '89)*, Dallas, USA, 1989.
- [Kaffel 01] Kaffel H., "La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre", *Thèse de doctorat*, Université de Laval, Québec, 2001.
- [Kaffel 03] Kaffel H., D'Amours S., Ait-Kadi D., "Les critères techniques pour le choix des acteurs dans un système de maintenance distribuée", *1^{er} Colloque international francophone sur la Performance et les Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM'03)*, Valenciennes, France, 2003.
- [Kalafatis 02] Kalafatis S. P., "Buyer-seller relationships along channels of distribution", *Industrial Marketing Management*, 31 (3), p. 215-228, 2002.
- [Kaplan 96] Kaplan R., Norton D., "Using the balanced scorecard as a strategic management system", *Harvard Business Review*, 1996.
- [Karacapilidis 01] Karacapilidis N., Papadias D., "Computer supported argumentation and collaborative decision making: the HERMES system", *Information Systems*, 26 (4), p. 259-277, 2001.
- [Kast 93] Kast R., *La théorie de la décision*, Ed. La Découverte, Coll. Repères, ISBN 2-7071-2211-4, 1993.
- [Kling 87] Kling R., "Defining the boundaries of computing across complex organizations", in *Critical issues in information systems research*, Ed. Boland R. and Hirschheim R., John Wiley & Sons, New York, USA, ISBN 0-471-91281-6, p. 307-362, 1987.
- [Kolski 93] Kolski C., Millot P., "Problems in telemaintenance and decision aid criteria for telemaintenance system design", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 11 (2), p. 99-106, 1993.
- [Kopácsi 07] Kopácsi S., Kovács G., Anufriev A., Michelini R., "Ambient Intelligence as enabling technology for modern business paradigms", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23 (2), p. 242-256, 2007.
- [Kraemer 88] Kraemer K. L., King J. L., "Computer-based systems for cooperative work and group decision making", *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 20 (2), p. 115-146, 1988.
- [Kronsteiner 05] Kronsteiner R., Ibrahim I. K., "Collaborative Decision Support in Mobile Environments: A Requirement Analysis", *2nd International Conference on Embedded Software and Systems (ICES'05)*, 2005.
- [Kvan 00] Kvan T., "Collaborative design: What is it?", *Automation in construction*, 9 (4), p. 409-415, 2000.
- [Kwon 01] Kwon O. B., Lee J. J., "A multi-agent intelligent system for efficient ERP maintenance", *Expert Systems with Applications*, 21 (4), p. 191-202, 2001.
- [Laborie 06] Laborie F., "Le concept de salle de décision collective et son application aux processus complexes EADS", *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2006.
- [Ladame 07] Ladame S., "Pratiques de coopérations interentreprises et outils TIC dans des réseaux de PME localisées: une démarche d'analyse par les pratiques d'usages", *Doctoriales du GDR TIC & Société*, Marne-la-Vallée, France, 2007.
- [Laforcade 04] Laforcade P., "Méta-modélisation UML pour la conception et la mise en œuvre de situations-problèmes coopératives", *Thèse de doctorat*, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [Laprie 95] Laprie J.C., Arlat J., Blanquart J.P., Costes A., Crouzet Y., Deswarte Y., Fabre J.C., Guillermain H., Kaaniche M., Kaoun K., Mazet C., Powell D., Rabejac C., Thevenod-Fosse P., *Guide de la sûreté de fonctionnement*, Ed. Cepaduc, ISBN 2-85428-382-1, 1995.
- [Lardeur 04] Lardeur E., Longueville B., "Mutual enhancement of systems engineering and decision-making through process modeling: toward an integrated framework", *Computers in Industry*, 55 (3), p. 269-282, 2004.

- [Lario 03] Lario Esteban F., Ortiz Bas A., Poler Escoto R., Perez Perales D., "Supply chain management modelling collaborative decision", *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA '03)*, 2, p. 137-141, 2003.
- [Lauras 04] Lauras M., "Méthodes de diagnostic et d'évaluation de performance pour la gestion de chaînes logistiques : application à la coopération maison mère - filières internationales dans un groupe pharmaceutique et cosmétique", *Thèse de doctorat*, INP de Toulouse, 2004.
- [Lavergne 83] Lavergne J.-P., *La décision : psychologie et méthodologie*, Les éditions E.S.F., Paris, ISBN 2-7101-0426-1, 1983.
- [Le Bars 03] Le Bars M., "Un Simulateur Multi-Agent pour l'Aide à la Décision d'un Collectif : Application à la Gestion d'une Ressource Limitée Agro-environnementale", *Thèse de doctorat*, Université Paris IX Dauphiné, 2003.
- [Le Moigne 74] Le Moigne J. L., *Les systèmes de décision dans les organisations*, Presses Universitaires de France, Paris, ISBN 2-13-032739-7, 1974.
- [Le Moigne 77] Le Moigne J. L., *La théorie du système général, théorie de la modélisation*, Presses Universitaires de France, Paris, ISBN 2-13-038483-8, 1977.
- [Le Parc 04] Le Parc P., Vareille J., Marcé L., "E-productique ou contrôle et supervision distante de systèmes mécaniques sur l'Internet", *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 38 (5), ISBN 2-7462-0944-6, p. 525-558, 2004.
- [Le Quéré 03] Le Quéré Y., Sevaux M., Tahon C., Trentesaux D., "Reactive Scheduling of Complex System Maintenance in a Cooperative Environment With Communication Times", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part C: Applications and Reviews*, 33 (2), p. 225-234, 2003.
- [Le Strugeon 95] Le Strugeon E., "Une méthodologie d'auto-adaptation d'un système multi-agents cognitifs", *Thèse de doctorat*, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1995.
- [Lee 06] Lee J., Ni J., Djurdjanovic D., Qiu H., Liao H., "Intelligent prognostics tools and e-maintenance", *Computers in Industry*, 57 (6), p. 476-489, 2006.
- [Lehtonen 05] Lehtonen O., Ala-Risku T., "Enhancing On-Site Maintenance Execution with ICT - A Case Study", *5th International Conference on Electronic Business*, Hong Kong, China, p. 882-895, 2005.
- [Levrat 06] Levrat E., Salzemann B., Clanché F., Bron J.Y., "TELMA Plate-forme d'intégration de télémaintenance pour l'enseignement et la recherche", *Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes (J3eA)*, 5 (HS 2), 2006.
- [Levy 04] Levy A., "Responsibility of ICT in the variance of decision making", *IEEE International Symposium on Applications and the Internet Workshops (SAINTW'04)*, Tokyo, Japan, ISBN 0-7695-2050-2, p. 34-41, 2004.
- [Limayem 01] Limayem F., "Modèles de pondération par les méthodes de tri croisé pour l'aide à la décision collaborative en projet", *Thèse de doctorat*, École Centrale Paris, 2001.
- [Longueville 03] Longueville B., "Capitalisation des processus de décision dans les projets d'innovation : application à l'automobile", *Thèse de doctorat*, École Centrale Paris, 2003.
- [Lubich 95] Lubich P. H., *Towards a CSCW framework for scientific cooperation in Europe*, LNCS 889, Ed. Springer Verlag, ISBN 3-5405-8844-2, 1995.
- [Madkit 08] Plateforme multi-agents libre téléchargeable, avec sa documentation, sur le site Internet : <http://www.madkit.org>.
- [Maher 98] Maher M. L., Cicognani A., Simoff S.J., "An experimental study of computer mediated collaborative design", *Journal of Design Computing*, 1, 1998.
- [Mahmoudi 06] Mahmoudi J., Lamothe J., Thierry C., "Un modèle de simulation pour coopérer au sein de la chaîne logistique des télécoms", *Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA'06)*, Bordeaux, France, 2006.
- [Maillet 05] Maillet P., "Approche normative des métiers de la maintenance industrielle - État de l'art des progiciels du domaine", *Mémoire en informatique*, Conservatoire des arts et métiers, 2005.
- [Mallet 06] Mallet C., Rousseau A., Valoggia P., "Gestion des connaissances, TIC et création de valeur organisationnelle : proposition d'un modèle d'évaluation", *15^e Conférence Internationale de Management Stratégique (AIMS)*, Annecy, France, 2006.
- [Marcotte 95] Marcotte F., "Contribution à la modélisation des systèmes de production: extension du modèle GRAI", *Thèse de doctorat*, Université de Bordeaux I, 1995.

- [Marzi 02] Marzi R., John P., "Supporting fault diagnosis through a multi-agent-architecture", *Mathematics and Computers in Simulation*, 60 (3-5), p. 217-224, 2002.
- [Mathieu 03] Mathieu S., *Réussir l'approche processus*, Ed. Saint Denis La Plaine - AFNOR, Coll. A SAVOIR, ISBN 2-12-505060-9, 2003.
- [Mattessich 92] Mattessich P. W., Monsey B. R., *Collaboration: What makes it work. A review of research literature on factors influencing successful collaboration*, Ed. Amherst H. Wilder Foundation, St. Paul, USA, ISBN 0-940-06902-4, 1992.
- [McKone 99] McKone K. E., Schroeder R. G., Cua K. O., "Total productive maintenance: a contextual view", *Journal of Operations Management*, 17 (2), p. 123-144, 1999.
- [Mechin 07] Mechin B., "Maintenance : concepts et définitions", *Techniques de l'Ingénieur*, MT 9030, 2007.
- [Melchert 04] Melchert F., Winter R., "The Enabling Role of Information Technology for Business Performance Management", *Decision Support in an Uncertain and Complex World: The IFIP TC8/WG8.3 International Conference 2004*, Prato, Italy, 2004.
- [Mélèse 72] Mélèse J., *L'analyse modulaire des systèmes de gestion*, Ed. Hommes et Techniques, 1972.
- [Merlo 04] Merlo C., Girard P., "Information system modelling for engineering design co-ordination", *Computers in Industry*, 55 (3), p. 317-334, 2004.
- [Mesarovic 80] Mesarovic M. D., Macko D., Takahara Y., *Théorie des systèmes hiérarchiques à niveaux multiples*, Ed. Économica, Paris, ISBN 2-7178-0269-X, 1980.
- [MIMOSA 08] *Projet MIMOSA (Machinery Information Management Open Systems Alliance)* initié par l'armée américaine, site internet : <http://www.mimosa.org>.
- [Molloy 82] Molloy M.K., "Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets", *IEEE Transactions on Computers*, 31 (9), p. 913-917, 1982.
- [Monchy 03] Monchy F., *Maintenance, Méthodes et Organisations*, Ed. DUNOD, Coll. L'Usine Nouvelle Série Gestion Industrielle (2^e édition), Paris, ISBN 2-10-007816-5, 2003.
- [Monteiro 01] Monteiro T., "Conduite distribuée d'une coopération entre entreprises : le cas de la relation donneurs d'ordres - fournisseurs", *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.
- [Monteiro 07] Monteiro T., Roy D., Anciaux D., "Multi-site coordination using a multi-agent system", *Computers in Industry*, 58 (4), p. 367-377, 2007.
- [Muller 08] Muller A., Crespo Marquez A., Iung B., "On the concept of e-maintenance: review and current research", *Reliability Engineering and System Safety*, 93 (8), p. 1165-1187, 2008.
- [Natkin 80] Natkin S., "Les réseaux de Petri Stochastiques", *Thèse de doctorat*, CNAM Paris, 1980.
- [Neuville 96] Neuville J-P., "Le contrat de confiance, études des mécanismes de coopération dans le partenariat industriel autour de deux grands constructeurs automobiles européens", *Thèse de doctorat*, Institut d'Études Politiques, Paris, 1996.
- [Nicolaou 04] Nicolaou A. I., "ERP Systems Implementation: Drivers of Post-Implementation Success", *Decision Support in an Uncertain and Complex World: The IFIP TC8/WG8.3 International Conference 2004*, Prato, Italy, 2004.
- [Nonaka 94] Nonaka I., "A Dynamic Theory of Organizational Knowledge Creation", *Organization Science*, 5 (1), p. 14-37, 1994.
- [Nonaka 95] Nonaka I., Takeuchi H., *The Knowledge Creating-Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*, Oxford University Press, ISBN 0-1950-9269-4, 1995.
- [Noyes 07] Noyes D., Garcia A., Clermont P., "Influence des ressources immatérielles liées à la e-maintenance dans l'allocation de maintenabilité", *3^e édition du colloque international francophone sur la Performance et les Nouvelles Technologies en Maintenance, (PENTOM'07)*, Mons, Belgique, 2007.
- [Office québécois 08] Site web de l'office québécois de la langue française, www.granddictionnaire.com.
- [Oulton 04] Oulton N., Srinivasan S., "ICT and productivity growth in the UK: an industry view and some comparisons with the US", *Asia-Pacific Productivity Conference (APPC2004)*, Brisbane, Australia, 2004.
- [Panzarasa 02] Panzarasa P., Jennings N. R., Norman T. J., "Formalising collaborative decision-making and practical reasoning in multi-agent systems", *Journal of Logic and Computation*, 12 (1), p. 55-117, 2002.

- [Parham 04] Parham D., "ICT: An engine or enabler of Australia's productivity growth?", *Asia-Pacific Productivity Conference (APPC2004)*, Brisbane, Australia, 2004.
- [Parsa 07] Parsa S., Parand F.-A., "Cooperative decision making in a knowledge grid environment", *Future Generation Computer Systems*, 23 (8), p. 932-938, 2007.
- [Pellegrin 97] Pellegrin C., *Fondements de la décision en maintenance*, Ed. Économica, ISBN 2-7178-3489-3, 1997.
- [Pendharkar 04] Pendharkar P. C., Young K., "The Development of a Construct for Measuring an Individual's Perceptions of Email as a Medium for Electronic Communication in Organizations", *IEEE Transactions on professional communication*, 47 (2), p. 130-143, 2004.
- [Pérès 04] Pérès F., Noyes D., Reyterou C., "Methodology of integration of Information and Communication Technologies in a maintenance process: application to the aeronautic field", *Intelligent Maintenance Systems*, 2004.
- [Pérès 05] Pérès F., "Apport du soutien logistique et de la maintenance à l'optimisation du couple Disponibilité Opérationnelle / Coût Global de Possession", *Habilitation à Diriger des Recherches*, INP de Toulouse, 2005.
- [Pérès 06] 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*, 57 (6), p. 490-503, 2006.
- [Perpen 00] Perpen J. L., "Définition et réalisation d'une association orientée objet pour la maîtrise du processus de coupe", *Thèse de doctorat*, Université de Bordeaux I, 2000.
- [Perrin 06] Perrin A., "Le transfert intra organisationnel des bonnes pratiques : quand l'entreprise joue au domino", *15^e Conférence Internationale de Management Stratégique (AIMS)*, Annecy, France, 2006.
- [Petri 62] Petri C. A., "Kommunikation mit Automaten" (communication with automata), PhD Thesis, Darmstadt University of Technology, Germany, 1962.
- [Polanyi 66] Polanyi M., *The tacit Dimension*, London, Routledge & Kegan Paul Ltd, 1966.
- [Poler 02] Poler R., Lario F. C., Doumeings G., "Dynamic modelling of Decision Systems (DMDS)", *Computers in Industry*, 49 (2), p. 175-193, 2002.
- [Pruitt 81] Pruitt D., *Negotiation Behavior*, Academic Press, New York, USA, ISBN 978-0125662505, 1981.
- [Rakoto 04] Rakoto H., "Intégration du Retour d'Expérience dans les processus industriels complexes", *Thèse de doctorat*, INP de Toulouse, 2004.
- [Rallet 04] Rallet A., Walkowiak E., "Technologies de l'Information et de la Communication, organisation du travail et évolution des qualifications", *Sciences de la société*, 63, 2004.
- [Rasovska 05a] Rasovska I., Chebel-Morello B., Zerhouni N., "Capitalisation des connaissances de diagnostic et de réparation d'équipement industriel", *6^e Congrès International de Génie Industriel (CIGI'05)*, Besançon, France, 2005.
- [Rasovska 05b] Rasovska I., Chebel-Morello B., Zerhouni N., "Process of s-maintenance: decision support system for maintenance intervention", *10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'05)*, 2005.
- [Reif 01] Reif G., Kirda E., Gall H., Picco G. P., Cugola G., Fenkam P., "A web-based peer-to-peer architecture for collaborative nomadic working", *10th IEEE Workshops on Enabling Technologies : Infrastructures for Collaborative Enterprises (WETICE)*, Boston, USA, p. 334-339, 2001.
- [Retif 02] Retif S., "Technologies de l'Information et de la Communication et Productivité", *Working paper*, Encyclopédie sur l'économie numérique en ligne sur le site old-www.jm.u-psud.fr/~adisrob/almanach.htm, 2002.
- [Rey 02] Rey C., "Découverte dynamique de e-services", *Journées scientifiques Web sémantique*, CNRS, Ivry-sur-Seine, 2002.
- [Reynaud 97] Reynaud J. D., *Les règles du jeu*, A. Colin, 3^e édition (1^e édition de 1989), Paris, ISBN 2-200-01677-8, 1997.
- [Reyterou 02] Reyterou C., "Une méthodologie pour l'intégration des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication dans les processus de maintenance aéronautique", *Thèse de doctorat*, École Centrale Paris, 2002.

- [Richet 96] Richet D., Gabriel M., Malon D., Blaison G., *Maintenance Basée sur la Fiabilité, un outil pour la certification*, Ed. Masson, Coll. Organisation Industrielle Science de l'ingénieur, ISBN 2-225-85382-7, 1996.
- [Rioux 02] Rioux D., "La collaboration client-fournisseur", *Groupe de consulting Créatech*, en ligne sur www.allbodies.com/Chroniques/chaine_approvisionnement/article05.shtml, 2002.
- [Robert 04] Ouvrage collectif sous la direction de Rey-Debove J., Rey A., *Le Petit Robert, Dictionnaire de la langue française*, Ed. Dictionnaires Le Robert (1^e édition de 1967), Paris, ISBN 2-85036-976-4, 2004.
- [Roboam 93] Roboam M., *La méthode GRAI*, Ed. Teknea, ISBN 2-87717-029-2, 1993.
- [Roche 00] Roche C., "Corporate ontologies and concurrent engineering", *Journal of Materials Processing Technology*, 107 (1-3), p. 187-193, 2000.
- [Rodden 91] Rodden T., "A Survey of CSCW Systems", *Interacting with Computers*, 3 (3), p. 319-353, 1991.
- [Rodriguez 02] Rodriguez Peralta L. M., Villemur T., Drira K., Molina-Espinosa J. M., "Managing dependencies in dynamic collaborations using coordination diagrams", *6th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS'02)*, Reims, France, 2002.
- [Roque 08] Roque M., Vallespir B., Doumeings G., "Interoperability in enterprise modelling: Translation, elementary constructs, meta-modelling and UEML development", *Computers in Industry*, 59 (7), p. 672-681, 2008.
- [Roschelle 95] Roschelle J., Teasley S., "The construction of shared knowledge in collaborative problem solving", In C. O'Malley (Ed.), *Computer supported collaborative learning*, Ed. Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [Rouhier 03] Rouhier S., "Mobilité et sans fil dans les grandes entreprises", *Journée débat publique : "la mobilité en entreprise / la voiture intelligente"*, Fondation Internet Nouvelle Génération (FIND), site www.fing.org/ref/nomadisme/Mobilites051203/Cigref-FING-051203-v2.pdf, 2003.
- [Roy 85] Roy B., *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, Ed. Économica, Paris, ISBN 2-7178-0901-5, 1985.
- [Roy 91] Roy B., "The outranking approach and the foundations of electre methods", *Theory and Decision*, 31 (1), p. 49-73, 1991.
- [Ryan 02] Ryan A. J., "Optimizing Group Utility in the Collaborative Decision Making Process", *Aircraft Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference - ALAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics)*, Los Angeles, USA, 2002.
- [Saad 96] Saad A., Kawamura K., Biswas G., "Performance evaluation of contract net-based heterarchical scheduling for flexible manufacturing systems", *International Journal of intelligent automation and soft computing, special issue on intelligent manufacturing planning and shopfloor control*, 1996.
- [Saaty 80] Saaty T. L., *The Analytic hierarchical process*, Mac-Graw-Hill, New-York, 1980.
- [Saikali 01] Saikali K., David B., "Using workflow for coordination in groupware applications", *Conférence conjointe IHM (Interface Homme-Machine) et HCI (Human-Computer Interaction)*, Lille, France, p. 399-411, 2001.
- [Schael 97] Schael T., *Théorie et pratique du workflow - Des processus métier renouvelés*, Ed. Springer, Berlin, New York (traduit et édité par Christian Rozeboom), ISBN 3-540-63456-8, 1997.
- [Schmidt 90] Schmidt K., *Analysis of Cooperative Work - A Conceptual Framework*, Risø National Laboratory, Risø-M-2890, Denmark, ISBN 87-550-1668-5, 1990.
- [Schreiber 94] Schreiber G., Wielinga B. J., de Hoog R., Akkermans H., Van de Velde W., "CommonKADS: A Comprehensive Methodology for KBS Development", *IEEE Expert*, 9(6), p. 28-37, 1994.
- [Schwartz 02] Schwartz R., Kraus S., "Negotiation on data allocation in multi-agent environments", *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 5 (2), p. 123-172, 2002.
- [Seguy 09] Seguy A., Noyes D., Clermont P., "Caractérisation et estimation des performances en e-maintenance", *Journal Européen des Systèmes Automatisés (J.E.S.A)*, ISSN 1269-6935, 43 (1-2), à paraître en février 2009.
- [Sfez 84] Sfez L., *La décision*, Ed. PUF, Coll. Que sais-je ?, Paris, ISBN 2-13-054313-8, 1984.

- [Shim 02] Shim J.P., Warkentin M., Courtney J. F., Power D. J., Sharda R., Carlsson C., "Past, present, and future of decision support technology", *Decision Support Systems*, 33 (2), p. 111-126, 2002.
- [Sidir 04] Sidir M., "Modes de collaborations au sein de groupes d'apprentissage dans une formation à distance universitaire", *Colloque Technologies de l'Information et de la Connaissance dans l'Enseignement Supérieur et l'Industrie (TICE)*, Compiègne, France, 2004.
- [Simon 60] Simon, H. A., *The new science of management decision*, Ed. Harper and Row, New York, USA, 1960.
- [Simon 77] Simon H. A., *The new science of management decision* (ed. revised), Prentice-Hall, New Jersey, USA, ISBN 0-1361-6136-7, 1977.
- [Smit 05] Smit D., Stewart R., Wall J., Betts M., "Implementing web-based collaboration platforms in construction: evaluating the eastlink experience", *Research Week International Conference*, Brisbane, Australia, ISBN 1-74107-101-1, 2005.
- [SMMART 05] *SMMART "System for mobile maintenance accessible in real time"*, FP6 Integrated Project IP 16726 of the European Commission, 6th Framework programme for Research and Technological Development, 2005-2008.
- [Soubie 05] Soubie J.-L., Zaraté P., "Distributed Decision Making: A Proposal of Support Through Cooperative Systems", *Group Decision and Negotiation*, 14 (2), p. 147-158, 2005.
- [St Voirin 02] Saint Voirin D., "Modélisation des approches de coopération en télémaintenance : étude et contribution", *Mémoire de DEA*, LAB-LIFC, Besançon, 2002.
- [St Voirin 06] Saint Voirin D., "Contribution à la modélisation et à l'analyse des systèmes coopératifs : application à la e-maintenance", *Thèse de doctorat*, Université de Franche-Comté, 2006.
- [Stal 00] Stal-Le Cardinal J., "Étude des dysfonctionnement des processus de décision, application au choix d'acteur", *Thèse de doctorat*, École Centrale Paris, 2000.
- [StpnPlay 08] *Logiciel libre de réseaux de Petri*, développé par Capek J., version 0.85, site Internet de téléchargement <http://dce.felk.cvut.cz/capekj/StpnPlay>.
- [Strauss 78] Strauss A. L., *Negotiations: Varieties, Processes, Contexts, and Social Order*, San Francisco, Ed. Jossey-Bass, 1978.
- [Sveiby 98] Sveiby K-E., "Intellectual Capital: thinking ahead", *Australian CPA*, 68 (5), p. 18-22, 1998.
- [Tararykine 05] Tararykine V., "Modélisation des flux d'information dans un système de e-maintenance", *Thèse de doctorat*, Université de Franche-Comté, 2005.
- [Tarpin 97] Tarpin-Bernard F., "Travail coopératif synchrone assisté par ordinateur : approche AMF-C", *Thèse de doctorat*, École Centrale Lyon, 1997.
- [TATEM 04] *TATEM "Technologies and Techniques for New Maintenance Concepts"*, FP6 Integrated Project IP 502909 of the European Commission, 6th Framework programme for Research and Technological Development, 2004-2008.
- [Telle 03] Telle O., "Gestion de chaînes logistiques dans le domaine aéronautique : Aide à la coopération au sein d'une relation Donneur d'Ordres/Fournisseur", *Thèse de doctorat*, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2003.
- [Thomassen 01] Thomassen M.-A., Lorenzen M., "The dynamic costs of coordination and specialization: production activities and learning processes in the Danish construction and furniture industries", *DRUID Nelson and Winter Conference*, Aalborg, Danemark, 12-15 June 2001.
- [Thun 06] Thun J.-H., "Maintaining preventive maintenance and maintenance prevention: analysing the dynamic implications of Total Productive Maintenance", *System Dynamics Review*, 22 (2), p.163-179, 2006.
- [Trentesaux 02] Trentesaux D., "Pilotage hétéroarchique des systèmes de production", *Habilitation à Diriger des Recherches*, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC), 2002.
- [Tsuchiya 93] Tsuchiya S., "Improving Knowledge Creation Ability through Organizational Learning", *International Symposium on the Management of Industrial and Corporate Knowledge (ISMICK'93)*, Compiègne, France, 1993.
- [UML2 07] Ouvrage collectif, *OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Superstructure, V2.1.2*, November 2007.
- [Vahidov 04] Vahidov R., Kersten G. E., "Decision station: situating decision support systems", *Decision Support Systems*, 38 (2), p. 283-303, 2004.
- [Vera 98] Vera A., Kvan T., West R., Lai S., "Expertise, Collaboration and Bandwidth", *CHI'98 Conference Proceedings*, Los Angeles, ACM Press, p. 503-510, 1998.

- [Verrons 04] Verrons M.-H., "GeNCA : un modèle général de négociation de contrats entre agents", *Thèse de doctorat*, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [Villemur 95] Villemur T., "Conception de services et de protocoles pour la gestion de groupes coopératifs", *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1995.
- [Vlahos 04] Vlahos G. E., Ferratt T. W., Knoepfle G., "The use of computer-based information systems by German managers to support decision making", *Information & Management*, 41 (6), p. 763-779, 2004.
- [Voisin 00] Voisin C., Plunket A., Bellon B., *La coopération industrielle*, Ed. Économica, ISBN 2-7178-4139-3, 2000.
- [Wambsganss 01] Wambsganss M., "Collaborative Decision Making in Air Traffic Management", *publié dans l'ouvrage "New concepts and methods in air traffic management"*, de L. Bianco, P. Dell'Olmo, A. R. Odoni, Ed. Springer, ISBN 3-5404-1637-4, 2001.
- [White 04] White T., "An exploratory study of the role of Internet technologies in the field of industrial maintenance: Is knowledge management the way forward?", *Journal of Information Systems and Technology Management*, 1 (1), p. 94-110, 2004.
- [Willaert 98] Willaert S. S. A., de Graaf R., Minderhoud S., "Collaborative engineering: A case study of Concurrent Engineering in a wider context", *Journal of Engineering and Technology Management*, 15 (1), p. 87-109, 1998.
- [Winer 94] Winer M., Ray K., *Collaboration handbook: creating, sustaining, and enjoying the Journey*, Ed. Amherst H. Wilder Foundation, St. Paul, USA, ISBN 0-940069-03-2, 1994.
- [Wooldridge 95] Wooldridge M., Jennings N. R., "Intelligent Agents: Theory and Practice", *Knowledge Engineering Review*, 10 (2), p. 115-152, 1995.
- [Xiao 05] Xiao A., Zeng S., Allen J. K., Rosen D. W., Mistree F., "Collaborative multidisciplinary decision making using game theory and design capability indices", *Research in Engineering Design*, 16 (1-2), p. 57-72, 2005.
- [Yu 03] Yu R., Jung B., Panetto H., "A multi-agents based E-maintenance system with case-based reasoning decision support", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16 (4), p. 321-333, 2003.
- [Zacklad 06] Zacklad M., "Une approche communicationnelle et documentaire des TIC dans la coordination et la régulation des flux transactionnels", *4^e édition de l'école d'été du GDR TIC et Société*, 2006.
- [Zaibet 06] Zaibet O., "Collaboration dans l'entreprise et intelligence collective", *15^e Conférence Internationale de Management Stratégique (AIMS)*, Annecy, France, 2006.
- [Zee 00] Van Der Zee Han T. M., Ribbers Pieter M.A., "Scenarios for Strategic Sourcing of Information and Communication Technology", *33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00)*, Hawaii, USA, 2000.
- [Zolghadri 02] Zolghadri M., Lecompte T., Bourrières J.-P., "Design of Decision Support Systems for Extended Enterprise", *Studies in Informatics and Control Journal*, 11 (1), 2002.

PUBLICATIONS PERSONNELLES

- [Seguy 09] **Seguy A.**, Noyes D., Clermont P., "Caractérisation et estimation des performances en e-maintenance", *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, ISSN 1269-6935, 43 (1-2), à paraître en février 2009.
- [Garcia 08] **Garcia A.**, Noyes D., Clermont P., "Knowledge distribution in e-maintenance activities", *IFIP International Conference on Collaborative Decision Making (CDM'08)*, Toulouse, France, Ed. IOS Press by Zaraté P., Belaud J.-P., Camilleri G., Ravat F., ISBN 978-1-58603-881-6, p. 344-355, July 1-4 2008.
- [Noyes 07] Noyes D., **Garcia A.**, Clermont P., "Influence des ressources immatérielles liées à la e-maintenance dans l'allocation de maintenabilité", *3^e édition du colloque international francophone*

- sur la Performance et les Nouvelles Technologies en Maintenance, (PENTOM'07), Mons, Belgique, 9-10 Juillet 2007.
- [Garcia 07] **Garcia A.**, Noyes D., Clermont P., "Performances des situations de e-maintenance", 7^e Congrès International de Génie Industriel (CIGI'07), Trois-Rivières, Québec, Canada, 5-8 Juin 2007.
- [Garcia 07b] **Garcia A.**, Noyes D., Clermont P., "Proposition d'éléments d'évaluation de performance de situations de e-maintenance", 7^e édition du congrès international pluridisciplinaire *Qualita'07*, Tanger, Maroc, Édité par M. Bennouna et A. El Hami, p. 890-897, 20-22 Mars 2007.
- [Garcia 06] **Garcia A.**, Noyes D., "Impact des technologies d'information et de communication sur un système décisionnel : cas de la maintenance", 6^e Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation (MOSIM'06), Rabat, Maroc, ISBN 2-7430-0893-8, p. 1110-1119, 3-5 Avril 2006.
- [Garcia 07d] **Garcia A.**, Noyes D., Clermont P., "Aide à l'intégration de la e-maintenance", 1^{er} Colloque MArocaïn de Génie Industriel (COMAGI'07), Agadir, Maroc, p. 35-45, 15-16 Juin 2007.
- [Garcia 06b] **Garcia A.**, Noyes D., Clermont P., "Intégration des TIC aux activités de maintenance - Modélisation de situations de e-maintenance", *Symposium International sur la Maintenance et la Maîtrise des Risques (MMR'06)*, Édité par Pr. M. Tahiri, Rabat, Maroc, p. 123-136, 2-4 Novembre 2006.
- [Garcia 07c] **Garcia A.**, "Modélisation de situations de e-maintenance et évaluation de performance", 8^e Congrès des Doctorants de l'École Doctorale Systèmes de Midi-Pyrénées, École des Mines d'Albi-Carmaux, France, Jeudi 10 Mai 2007.



ANNEXE. SYSTÈMES MULTIAGENTS

Nous avons utilisé la programmation agent pour développer un système multiagents (SMA)⁹ représentant des scénarios de e-maintenance, en accord avec les principes de modélisation présentés au paragraphe IV.2.

Avant de présenter le SMA développé, nous rappelons les principaux éléments de la programmation agent.

A.1 Présentation des SMA

Au croisement entre l'intelligence artificielle et les systèmes distribués, les systèmes multiagents (SMA) sont apparus dans les années 1970-80.

La programmation des SMA constitue une évolution des langages objet pour arriver aux langages "agent". L'approche agent s'appuie notamment sur la puissance de calcul des langages objet qui facilitent les calculs en les parallélisant, réduisant ainsi la complexité de modélisation. Ces langages combinent les principes de classes (et d'objets), d'intelligence et de systèmes distribués pour permettre une programmation dédiée aux agents et SMA permettant de modéliser la coopération des agents, leur autonomie, leur capacité à s'auto-réguler,...

Les recherches en SMA ont été marquées par les travaux de Jennings, Wooldridge ou encore Ferber qui ont largement contribué au développement des SMA et fait apparaître la notion d'agent (définie au paragraphe suivant) [Ferber 95], [Wooldridge 95] et [Jennings 98].

A.1.1 Agent et SMA

Les SMA sont composés d'agents, entités spécialisées, plus ou moins autonomes. Les SMA sont basés sur les agents et sur leurs interactions. Dans un SMA, tout peut être distribué : les connaissances, le contrôle, les activités, ... contrairement aux systèmes centralisés.

Ferber définit un agent comme une entité physique ou virtuelle [Ferber 95] :

- capable d'agir dans un environnement,
- pouvant communiquer directement avec d'autres agents,
- mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- possédant des ressources propres,
- capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,

⁹ Ces travaux ont été partiellement développés dans le cadre d'un projet tutoré réalisé avec des étudiants de semestre 8 (Bac+4) de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes.

- ne disposant que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement d'aucune),
- possédant des compétences et offrant des services,
- pouvant éventuellement se reproduire,
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

De par son caractère autonome, un agent peut être assimilé à une extension d'un objet. L'aspect "entité virtuelle" n'exclut pas l'être humain du monde des agents.

Ferber définit un SMA comme composé des éléments suivants [Ferber 95] :

- un environnement E ,
- un ensemble d'objets O : situés (association d'une position, à un instant donné) et passifs (modifiables par les agents),
- un ensemble A d'agents : objets particuliers qui sont actifs,
- un ensemble de relations R qui unissent des objets (et des agents) entre eux,
- un ensemble d'opérations Op permettant aux agents (A) de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets (O),
- des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, appelées "lois de l'univers".

Les agents peuvent être programmés de plusieurs manières. Il existe classiquement deux catégories d'agents : les agents réactifs, très simples, réagissant directement aux modifications de l'environnement et les agents cognitifs, entités intelligentes capables de résoudre avec leurs propres connaissances certains problèmes.

Il est également possible d'avoir des agents hybrides associant des caractéristiques appartenant aux agents cognitifs et d'autres appartenant aux agents réactifs.

Les agents les plus couramment utilisés sont les agents cognitifs car ils sont issus des systèmes experts classiques [Ferber 95]. C'est également le choix que nous effectuons pour notre développement.

A.1.2 Principes de la programmation agent

Dans un SMA, les agents doivent coopérer pour être utiles et contribuer à la modélisation et à la résolution du problème considéré. Pour cela, les agents peuvent être en compétition et parfois lutter pour coexister avec le recours à la négociation entre agents pour résoudre leurs éventuels conflits.

Une des principales caractéristiques des SMA est la distribution du problème modélisé entre les agents qui le composent, ce qui n'empêche pas les SMA d'être structurés et organisés.

A.1.2.1. Organisation des SMA

Les organisations des SMA sont hétérarchiques de type [Le Strugeon 95] :

- marché : composé d'agents coordinateurs et d'agents exécutants,
- communauté : composé d'agents ayant des objectifs multiples avec un contrôle distribué,
- société : composée d'unités ayant chacune un objectif opérationnel, avec un contrôle décentralisé autour des unités.

Les SMA peuvent intégrer la notion de rôle joué par les agents (notion plus amplement détaillée dans la présentation de *MadKit* au paragraphe A.1.3).

Nous choisissons une organisation de type marché pour la conception du SMA décrivant les activités de e-maintenance en vue d'en évaluer les performances. Ce choix d'organisation nous permet d'envisager un fonctionnement basé sur le principe de l'offre et de la demande : face à une demande d'intervention, le système va fournir l'offre la plus adaptée (l'agent le plus compétent) à la résolution de l'intervention considérée.

A.1.2.2. Communication dans les SMA

La communication permet de synchroniser les agents et de résoudre les conflits éventuels. Elle conditionne aussi la qualité de la coopération et de la négociation.

Il existe deux principaux types de communication entre agents : par tableau noir (Figure A.1a) ou par envoi de messages (Figure A.1b).

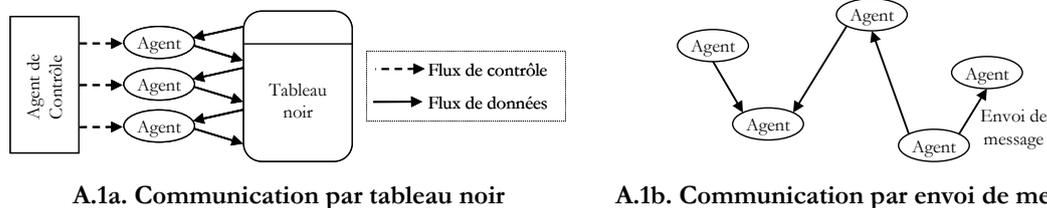


Figure A.1. Deux types de communication entre agents

Un système de tableau est composé des principaux éléments présentés sur la Figure A.1a [Hayes-Roth 85]. Ce mécanisme de communication est basé sur l'écriture de toutes les informations connues et échangées entre agents et tous les problèmes à résoudre en un même endroit : le tableau noir. Chaque agent essaie de résoudre, selon ses connaissances et compétences, les problèmes présents sur le tableau noir en proposant des réponses à ces problèmes sur le tableau.

Les envois de messages (Figure A.1b) permettent une communication directe entre agents, sans intermédiaire. Ce mécanisme a été initié dans [Briot 89]. La communication est composée de la transmission du message et de son traitement en local. Lors de la transmission d'un message, l'agent récepteur doit procéder au traitement de ce message à partir de sa connaissance de l'environnement, des autres agents et des données dont il dispose. Ce type de communication met en évidence la modularité des SMA car les agents peuvent faire évoluer leur comportement suite à un message, à un changement de leur environnement ou à la distribution des connaissances (décentralisées, contrairement aux systèmes à tableau noir) entre les agents.

Le système à tableau noir implique une communication centralisée et indirecte, contrairement au système d'envoi de messages qui permet une communication distribuée et directe. Nous retenons donc le principe d'envoi de messages puisqu'il permet une communication directe entre agents, sans intermédiaire et des échanges synchrones afin d'avoir un système réactif aux sollicitations d'intervention permettant une réaction rapide suite à l'occurrence des sollicitations d'intervention.

Les relations entre agents bénéficient d'une dénomination spécifique : les accointances entre agents. Ces relations peuvent être statiques lorsque les accointances sont définies à la conception de l'agent ou dynamiques lorsqu'elles peuvent être déclarées en fonction des évolutions de l'environnement des agents, des besoins de coopération,...

Dans notre SMA, nous avons retenu la définition statique des accointances des agents en spécifiant lors de la programmation les accointances de chaque agent. Cette définition est la plus simple est convient bien à notre étude ayant un nombre fini d'agents identifiés dès le lancement de la simulation.

A.1.2.3. Interaction entre agents

Les relations entre agents peuvent être plus fortes qu'une simple communication et combiner plusieurs modes de travail collectif : coordination, négociation ou collaboration.

Un conflit peut apparaître si les actions des agents sont : incompatibles, redondantes ou si elles sont dépendantes et doivent être synchronisées.

La résolution d'un conflit peut être réalisée :

- par l'organisation du SMA, par exemple, les relations hiérarchiques définissent clairement le décideur parmi deux agents en conflit,
- par les mécanismes de coordination tels le vote, la vente aux enchères ou l'appel d'offre,
- par les capacités sociales individuelles des agents : par leur raisonnement et leurs règles internes, les agents peuvent être capables de résoudre un conflit.

Résoudre un conflit via les capacités de raisonnement d'un agent peut s'avérer complexe à mettre en œuvre car cela nécessite un important travail de programmation du raisonnement des agents. Il en est de même pour les relations hiérarchiques qui ne seront pas modélisées dans notre approche.

Nous avons donc retenu à ce niveau le mécanisme de coordination basé sur le principe de l'appel d'offre. Ce principe est programmable à partir du protocole de coordination appelé Contract-Net ("réseau de contrats") et normalisé par l'organisme FIPA [*FIPA Contract-net 02*]. Ce protocole consiste à diffuser un message d'appel d'offre à plusieurs agents en indiquant la tâche à réaliser. Chaque agent contacté propose une réponse à l'appel d'offre. L'émetteur compare les offres reçues et attribue le contrat à la meilleure offre. Le contrat définit ainsi une relation spécifique et bornée entre un manager et un contractant, uniquement pour ce contrat-là.

A.1.3 Plateforme SMA utilisée : MadKit

Parmi les plateformes SMA existantes, nous avons fait le choix de *MadKit* (Multiagents development Kit). Cette plateforme a été développée par l'équipe de Ferber au LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique) de l'Université de Montpellier II [*Ferber 98*], [*Gutknecht 01*].

Nous avons retenu cette plateforme pour plusieurs raisons :

- il s'agit d'une plateforme libre de type "Open Source",
- elle est mise à jour régulièrement car elle fait l'objet de développements et d'améliorations continus via son site Internet [*Madkit 08*],
- elle n'est pas dédiée à un domaine applicatif spécifique (contrairement à de nombreuses plateformes existantes développées uniquement pour une application particulière),
- elle est complète puisqu'elle intègre les différentes étapes nécessaires à la conception d'un SMA (édition du code, compilation, simulation,...).

MadKit est un outil de développement basé sur le modèle Aalaadin [*Ferber 98*]. Ce modèle associe trois concepts fondamentaux : agent, groupe et rôle comme illustré sur la [Figure A.2](#).

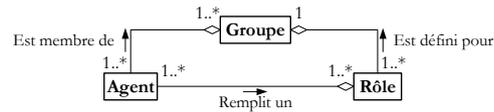


Figure A.2. Principe Aalaadin reliant agent, groupe et rôle

Un agent est uniquement qualifié comme une entité communicante qui joue des rôles en appartenant à des groupes, sans contrainte particulière concernant l'architecture interne des agents.

Un groupe définit un regroupement d'agents qui communiquent selon le même protocole et le même langage.

Un rôle correspond à une fonction, un service ou une identification d'un agent au sein d'un groupe. Un rôle nécessite des compétences et fournit des capacités permettant à l'agent de mener des actions.

En associant communication et rôle, les agents peuvent remplir plusieurs rôles, appartenir à plusieurs groupes et dialoguer avec d'autres agents.

MadKit n'impose pas d'architecture spécifique aux agents ; il est possible de développer des agents réactifs ou cognitifs et de constituer des SMA combinant ces types d'agents. MadKit dispose, comme la plupart des plateformes existantes, de la gestion simultanée de plusieurs agents et de la mise à disposition de moyens de communication entre agents ou de la gestion distribuée de l'exécution sur plusieurs machines.

MadKit est également basé sur les concepts :

- "de micro-noyau agent" gérant les organisations des agents (rôles et groupes) et les communications au sein de la plateforme,
- "d'agentification des services" signifiant que la plateforme et ses fonctionnalités (les outils de développement, de visualisation ou de surveillance des agents) sont elles-mêmes programmées à l'aide d'agents.

A.2 SMA développé

A.2.1 Agents développés

Le SMA est essentiellement basé sur le fonctionnement des agents qui, en communiquant par émission et réception de messages, font évoluer le système. Chaque agent est développé à partir du micro-noyau de MadKit et constitue une entité active et communicante, pouvant jouer des rôles et appartenir à des groupes.

Nous avons défini cinq types d'agents cognitifs à partir de la classe "agent" de MadKit :

- une sollicitation d'intervention qui matérialise l'intervention et la déclenche,
- une base de données qui peut aider à la résolution de l'intervention,
- un opérateur qui constitue la première catégorie d'acteur intervenant en maintenance,
- un mainteneur qui constitue la deuxième catégorie d'acteur,
- un expert qui représente la dernière catégorie d'acteur.

La vie (méthode "live") de l'agent peut être décomposée en règles qui spécifient le comportement de l'agent en fonction des autres agents et de son environnement. Ces règles peuvent être appréhendées comme des règles décisionnelles, essentiellement destinées à la communication de l'agent (principale activité des trois agents : opérateur, mainteneur et expert). Par exemple, nous trouverons pour

l'opérateur la règle : *si je ne sais pas résoudre seul alors consulter une base de données*. Des règles différentes sont associées à chaque agent selon ses connaissances et ses compétences (ses capacités de traitement) en fonction du niveau de complexité de l'intervention.

La communication de l'agent est intégrée à sa méthode "live" puisque c'est sa principale activité. La dynamique du système dépend de la communication ; il en est de même pour la collaboration qui est supportée par les échanges entre agents. La communication fait appel à la classe "Message" composée de méthodes lui permettant d'émettre, de recevoir ou d'attendre un message.

Avec cette classe, les agents peuvent communiquer et faire ainsi évoluer le SMA. La "vie" de chaque agent (fonction live) est d'attendre de nouveaux messages. S'il est disponible, l'agent traite directement les messages reçus, sinon les messages sont stockés dans une file d'attente.

La communication des agents peut être ciblée vers un rôle précis ou, au contraire, peut être destinée à l'ensemble des agents du groupe.

La définition du SMA spécifie l'appartenance des agents à un même groupe (appelé dans notre exemple "système de e-maintenance"). Les agents de ce SMA ont la possibilité de remplir des rôles au sein de ce groupe : opérateur, mainteneur et expert.

Pour réaliser les scénarios d'intervention, nous avons défini des caractéristiques associées aux agents permettant de spécifier leur capacité de traitement. Chaque agent (opérateur, mainteneur et expert) peut être considéré comme un centre de décision. Pour cela, nous avons défini les taux A, B, C et D de chaque acteur, définis au paragraphe IV.2.2.2.1 et la disponibilité des acteurs.

REMARQUE. L'indisponibilité des acteurs résulte de leur propre indisponibilité et celle du e-service (suite à une défaillance ou à un dysfonctionnement du e-service rompant la communication avec les agents externalisés).

L'agent sollicitation va initier le scénario et la réalisation de l'intervention. Il est associé à une variable définissant le niveau de complexité de l'intervention, orientant ainsi son traitement vers la catégorie d'acteur la plus appropriée. Cet agent est détruit lorsque l'intervention est terminée et de nouveaux agents sont créés selon la fréquence de génération des demandes d'intervention.

Pour faciliter l'évaluation des performances de ce SMA, nous avons également spécifié des agents dédiés à l'évaluation et utilisé des éléments prédéfinis de MadKit :

- agent indicateur qui permet essentiellement de compter les sollicitations traitées et les agents présents dans le SMA,
- fonction organization tracer (de MadKit) qui permet de suivre les affectations de rôles,
- fonction group message tracer (de MadKit) qui permet de suivre les messages échangés entre les agents du SMA,
- fonction diagramme de séquence du groupe "système de e-maintenance" (de MadKit) qui permet également de suivre les messages selon la représentation graphique des diagrammes de séquence UML.

Avec ces éléments, nous pourrions évaluer les interventions, les acteurs intervenant dans leur résolution, les durées et coûts de chaque intervention.

A.2.2 État initial du SMA

Nous associons à chaque type d'agent composant le SMA une représentation comme illustré sur la [Figure A.3](#).

Les trois types d'agents associés aux acteurs de maintenance ont une représentation composée de deux éléments (Figure A.3) :

- une représentation graphique statique des connaissances et taux de disponibilité de l'agent,
- une zone retraçant les évènements associés à l'agent (ses échanges : émission ou réception de messages, ses états : occupé ou libre et ses activités de traitement des interventions).

Sur la Figure A.3, des boutons permettant d'interagir avec certains agents (opérateur, mainteneur et expert) sont visibles. Ils permettent d'effacer la trace des évènements associés à l'agent ou de valider manuellement certaines étapes comme, par exemple, les étapes de négociation entre deux agents lors du passage d'une intervention d'un agent à un agent d'un niveau supérieur.

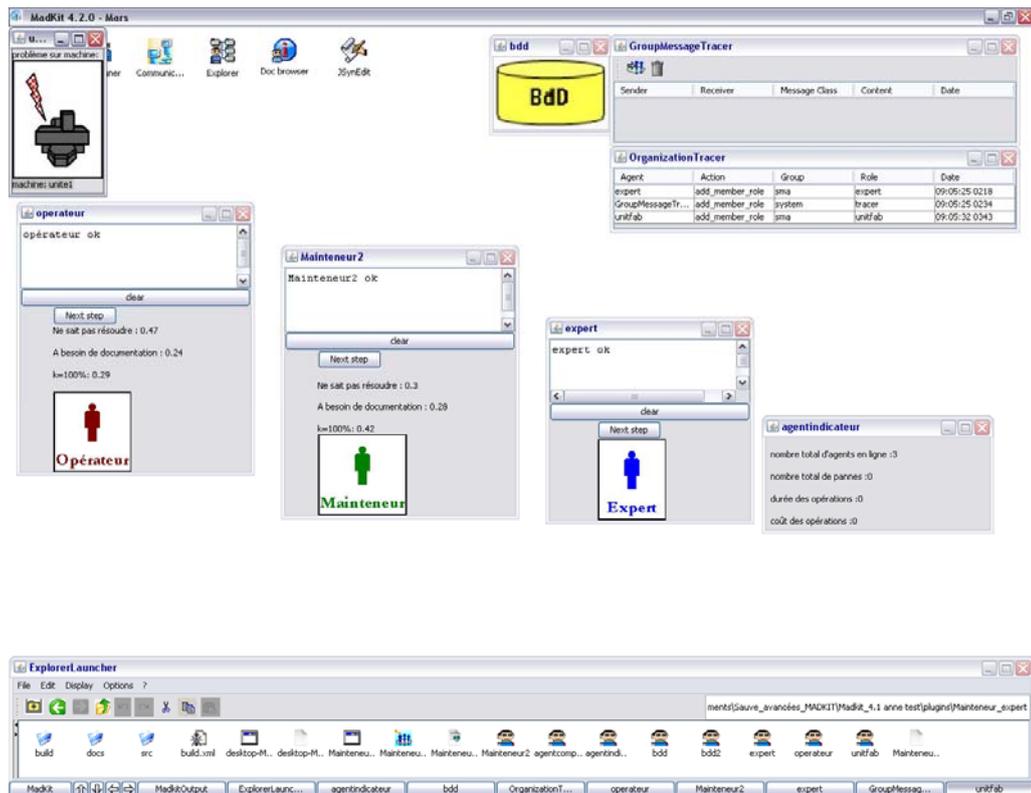


Figure A.3. Présentation des agents du SMA développé dans l'environnement MadKit

Les agents base de données et sollicitation ont un fonctionnement plus simple. La base de données peut être seulement indisponible en cas d'échec du e-service. La sollicitation est associée à un niveau de complexité (c'est également elle qui déclenche le scénario).

Comme nous l'avons déjà noté, la plupart des autres agents utilisés pour l'évaluation sont déjà présents dans MadKit. Seul l'agent indicateur permet de compter les agents présents dans la simulation et le nombre d'interventions déjà simulées.

A.2.3 Simulation du SMA

Le traitement des sollicitations d'intervention peut être réalisé en parallèle selon la disponibilité des acteurs. Pour cela, ces sollicitations sont placées dans une file d'attente selon la logique FIFO (First In First Out) et selon leur date d'apparition.

Le scénario débute avec la génération d'une sollicitation (lancement d'un agent sollicitation).

Le SMA réalise les interventions, en fonction des caractéristiques des agents opérateur, mainteneur et expert. De manière autonome, les collaborations entre acteurs se créent et s'arrêtent en fonction de l'intervention et de ses besoins en connaissances détenues par les acteurs ou les bases de données. L'intégration de la disponibilité des acteurs et du fonctionnement du e-service permet de réaliser des simulations réalistes.

Partant de la représentation initiale du SMA ([Figure A.3](#)), nous simulons le traitement de plusieurs interventions afin d'étudier la distribution des traitements parmi les différents acteurs.

La distribution entre le mode local et le mode externalisé est implicite : si l'opérateur traite l'intervention seul, il s'agit du mode local, sinon il s'agit d'un traitement utilisant des connaissances externalisées (base de données, mainteneur ou expert).

En cas d'indisponibilité d'un acteur, un autre acteur de niveau supérieur est contacté, sinon le système attend que l'acteur soit à nouveau disponible pour qu'il traite l'intervention.

A.2.4 Évaluation des simulations

Pour évaluer les simulations, nous nous appuyons sur les agents dédiés et sur la trace de chaque agent pour résumer le traitement de chaque intervention, avec :

- les affectations de rôles,
- les acteurs intervenant dans le traitement de chaque intervention,
- le nombre d'échanges effectués,
- le détail des messages échangés,
- les impossibilités de traitement en cas d'acteur indisponible ou ne possédant pas le niveau de connaissances requises pour l'intervention considérée ou en cas de défaillance du e-service.

Nous proposons ici une simulation de 100 sollicitations, afin d'obtenir une répartition convenable des sollicitations entre les différents scénarios considérés. Pour cela, nous définissons dans le cas illustré :

- une distribution des sollicitations d'intervention de type Pareto, les interventions sont arbitrairement réparties ainsi : 50% de niveau 1, 30% de niveau 2, 10% de niveau 3, 7% de niveau 4 et 3% de niveau 5 (cf. les niveaux de maintenance du [paragraphe I.1.1.1.3](#)),
- le niveau de connaissances de chaque agent : l'opérateur peut traiter le niveau 1 et 50% du niveau 2, le mainteneur peut traiter les 50% restants du niveau 2, le niveau 3 et 50% du niveau 4, l'expert traite les 50% restants du niveau 4 et le niveau 5,
- la disponibilité des agents qui intègre leur disponibilité propre et celle des TIC permettant la communication : l'opérateur est disponible à 100%, le mainteneur à 80% et l'expert à 20%.

Nous réalisons la simulation avec ce paramétrage arbitraire des agents. Pour chaque sollicitation générée, l'objectif du SMA est de résoudre au mieux l'intervention en fonction de son niveau, de la disponibilité des acteurs et de leurs connaissances.

Nous avons observé "en temps réel" le traitement des sollicitations entre les trois acteurs et les bases de données. Nous avons constaté les échanges traduisant la collaboration et la négociation entre agents devant travailler ensemble pour le traitement d'une sollicitation ou lors d'indisponibilité d'agents.

Le diagramme de séquence permet de suivre les échanges réalisés au cours d'une simulation ([Figure A.4](#)).

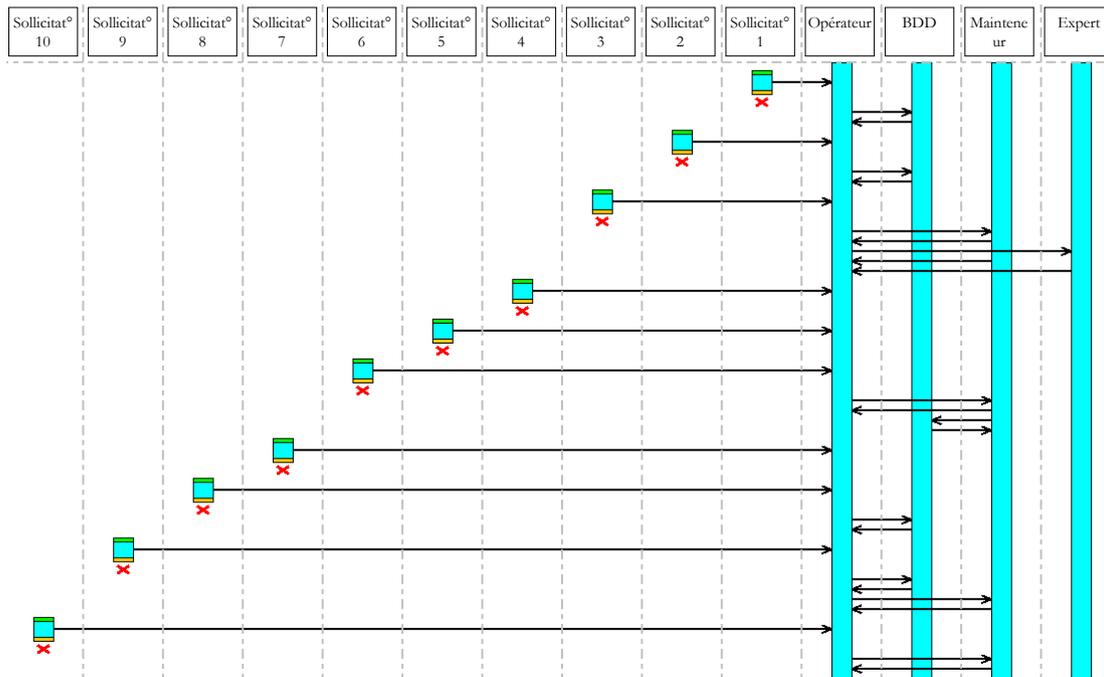


Figure A.4. Diagramme de séquence obtenu à partir de MadKit

Sur la [Figure A.4](#), nous n'avons représenté que les dix premières sollicitations de la série de simulations précédente.

Pour chaque sollicitation (détruite après leur traitement) l'opérateur, premier acteur contacté peut, selon la complexité de la sollicitation, traiter seul (sollicitations n°4, 5 et 7), avec la base de données (sollicitations n°1, 2 et 8) ou contacter le mainteneur.

Si le mainteneur est disponible, il traite seul (sollicitations n°9 après consultation par l'opérateur de la base de données indisponible et n°10) ou avec la base de données (sollicitations n°6).

Si le mainteneur est indisponible, l'opérateur contacte l'expert pour qu'il traite la sollicitation (sollicitations n°3).

Ce diagramme restitue les scénarios de chaque sollicitation simulée, mettant en évidence les échanges d'acteurs, les rôles assurés (acteurs ayant effectivement traité la sollicitation, ceux n'ayant pas les connaissances requises), l'indisponibilité des acteurs,...

De par le paramétrage des modèles, une grande diversité de situations d'interventions de maintenance peut être aisément simulée.

La mise en place de structures de coûts et de durées associées aux séquences et échanges d'acteurs permettra une quantification du déroulement des interventions et l'établissement des indicateurs correspondants.

Cette analyse peut être complétée par celle statistique des distributions finales des scénarios, permettant l'établissement d'indicateurs moyens sur le traitement des sollicitations et de leurs résultats. Par exemple, pour la série de simulation présentée en illustration, les 100 interventions analysées dans les conditions de paramétrage données se sont réparties suivant les distributions de la [Figure A.5](#).

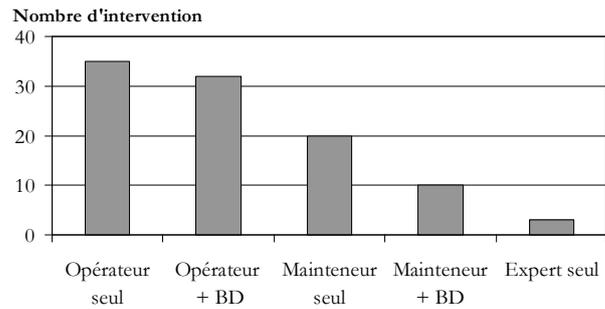


Figure A.5. Distribution des 100 simulations d'intervention via notre SMA

Une majorité des traitements est réalisée par l'opérateur (niveaux 1 et 2). Nous constatons un faible engagement de l'expert car le mainteneur est souvent disponible pour les niveaux 4 et l'expert peut seulement traiter les niveaux 5.

Ce résultat restitue l'engagement des acteurs et de leurs connaissances nécessaires au traitement des sollicitations. Il synthétise la répartition de la complexité des sollicitations mais également la disponibilité des acteurs capables de traiter une sollicitation d'un niveau de complexité donné.

Cet engagement de l'outil SMA pour la simulation et l'évaluation de scénarios est utilisable aussi bien pour une simple évaluation statique d'une situation précise que pour le déploiement d'une nouvelle organisation d'un service de maintenance.



Décision collaborative dans les systèmes distribués

—

Application à la e-maintenance

Depuis leur apparition, les Technologies d'Information et de Communication (TIC) ont intégré et fait évoluer les modes de travail des entreprises, avec les notions de e-service, de travail collaboratif, d'organisations distribuées et de mutualisation des connaissances. Nous considérons cette intégration des TIC à la fonction maintenance, activité clé de la performance des entreprises, largement pénétrée par ces technologies avec, par exemple, les concepts de e-maintenance.

Nos objectifs sont d'analyser les processus décisionnels collaboratifs et l'influence des TIC sur ceux-ci et de proposer les moyens d'évaluer les performances d'un service de maintenance supporté par les TIC. La modélisation du problème revêt un aspect multidomaine, multivue et multiacteur et l'évaluation des performances est multicritère.

Nous proposons, tout d'abord, une modélisation des situations de e-maintenance en nous appuyant sur la représentation des processus et en utilisant le formalisme objet, afin de mettre en évidence les composants clés des activités de e-maintenance et l'influence des TIC. Ensuite, nous étudions les activités de décision collaborative en analysant la logique de regroupement de centres de décision, supports des décisions et nous caractérisons les ressources immatérielles engagées. Enfin, nous proposons un cadre d'évaluation des performances des activités de e-maintenance et des modèles de représentation permettant de simuler des configurations d'engagement de ces ressources et de guider les choix d'organisation afférents.

Mots-clés : décision collaborative, maintenance, TIC (Technologies d'Information et de Communication), gestion des connaissances, évaluation des performances.

Collaborative decision making in distributed systems

—

Application to e-maintenance

The Information and Communication Technologies (ICTs) involve many changes in the companies functioning, with the concepts of e-service, collaborative work, distributed organizations and knowledge sharing. We consider this integration of ICTs to the maintenance function, main activity of companies' performance which is widely affected by these technologies with, for example, the e-maintenance concept.

Our objectives are to analyze the collaborative decision making process and the influence of ICTs on them and to propose ways to assess the performance of a maintenance service assisted by ICTs. The modelling of the problem is multidomain, multiview and multiactor and the performance is multicriteria.

First, we propose a modelling of e-maintenance situations based on the process representation and on the formalism object to highlight key components of e-maintenance and influence of ICTs. Then, we investigate the activities of collaborative decision making by analyzing and grouping decision making centers which support the decisions and we characterize the intangible resources committed. Finally, we propose a framework for evaluate the performance of e-maintenance and the representation models to simulate configurations of distribution of these resources and allow to make organizational choices related.

Key-words: collaborative decision making, maintenance, ICTs (Information and Communication Technologies), knowledge management, performance evaluation.